



Etude de pré faisabilité d'une filière de bioélectricité à partir de biomasse ligneuse, Île Rodrigues (Maurice)

Réf. : COI/ENERGIE/SERV/2018/046

Rapport final

Date: 05 juin 2019

Authors:

- François BROUST (CIRAD, UR BioWooEB, Réunion)
- Laurent Gazull (CIRAD, UR Forêts et Sociétés, France)
- Laurent Van de Steene (CIRAD, UR BioWooEB, France)

Avant-propos

This work was carried out by CIRAD within the framework of the COI-Energies program financed by the European Union (10th EDF / European Development Funds).

The authors wish to thank warmly

- The Indian Ocean Commission for the trust granted;
- The National Focal Points of the IOC-Energy Program;
- The local authorities and stakeholders for their interest and the time spent;
- All the contributors to this study.

Cette publication a été produite avec l'assistance de l'Union européenne. Le contenu de cette publication tient à la seule responsabilité du CIRAD en charge de l'étude et ne reflète en aucun cas les opinions de l'Union européenne.

Sommaire

Avant-propos.....	2
Table des illustrations.....	5
Table des tableaux.....	6
Résumé exécutif.....	7
Introduction : contexte & objectifs	9
1 Contexte de l'étude.....	9
1.1 Programme Energies de la COI.....	9
1.2 Objectifs de l'étude – termes de référence	9
2 Cadre général et méthodologie.....	10
2.1 Description sommaire d'une filière de bioélectricité.....	10
2.2 Approche méthodologique	10
2.3 Les missions à Rodrigues	11
Analyse du contexte de l'île Rodrigues	12
1 Présentation générale	12
2 Contexte énergétique.....	13
2.1 Une production électrique fortement dépendante des énergies fossiles	13
2.2 Vers le déploiement d'Energies Renouvelables dans le mix énergétique/électrique.	13
2.3 Analyse succincte de la demande en électricité.....	14
2.4 Cadre réglementaire relatif au raccordement de nouvelles centrales	15
2.5 Une demande limitée en chaleur sur le territoire.....	15
3 Contexte environnemental : lutte contre les espèces invasives	16
3.1 Initiatives et programmes	16
3.2 Acteurs.....	16
Analyse des gisements disponibles en biomasse ligneuse.....	17
1 Etat des lieux général des ressources ligneuses sur le territoire	17
1.1 Ressources forestières.....	17
1.2 Déchets verts ligneux	17
1.3 Ressources agricoles.....	18
2 Analyse des ressources forestières de l'île.....	19
2.1 Cartographie des formations forestières	19
2.2 Les ressources exploitables à court terme	22
2.3 Les ressources exploitables à plus long terme	27
2.4 Synthèse des ressources exploitables : gisements estimés et contraintes.....	29
Evaluation préliminaire d'une filière de bioélectricité.....	30
1 Pré-dimensionnement d'une potentielle centrale électrique	30

1.1	Energie primaire disponible	30
1.2	Puissance électrique potentielle	31
2	Propositions de solutions	34
2.1	Technologie envisagée pour la centrale.....	34
2.2	Type de combustible et conditionnement requis	37
2.3	Organisation de l'approvisionnement en plaquettes forestières	37
2.4	Eléments préliminaires de coûts	39
	Conclusions et recommandations	43
	Annexe.....	46
1	Annexe 1 : Programmes des missions à Rodrigues	46
1.1	Mission du 04 au 06 décembre 2018	46
1.2	Mission du 25 au 27 février 2019	46
2	Annexe 2 : Liste de contacts	47
3	Annexe 3 : Cartes.....	48
	Références.....	49

Table des illustrations

Figure 1 : schématisation d'une filière bioélectricité.....	10
Figure 2 : Mix électrique à Rodrigues – 2011 ¹	13
Figure 3 : Réseau électrique à Rodrigues – 2011 – source CEB ¹	14
Figure 4 : Carte des formations forestières de Rodrigues.....	21
Figure 5 : Les procédés de gazéification et combustion dans une filière bioélectricité	30
Figure 6 : PCI du bois en fonction de son humidité (source Valbiom)	30
Figure 7 : Estimation de puissance électrique pour différentes valeurs de rendements électriques (15-25%), en fonction des capacités d'approvisionnement en biomasse.....	32
Figure 8 : production d'électricité par combustion (schéma de principe).....	34
Figure 9 Schéma de principe de la production d'électricité par gazéification de biomasse lignocellulosique.....	34
Figure 10 : Exemples de centrales électriques sur le principe de couplage de réacteurs de gazéification parallèle.....	36
Figure 11 : Illustration d'une proposition d'organisation de l'approvisionnement en plaquettes d'une centrale.....	38
Photo 1 : les paysages agricoles et forestiers de l'île.....	18
Photo 2 : Massif d'Eucalyptus mené en taillis.....	22
Photo 3 : Massif de forêt mature en mélange en cours de restauration.....	24
Photo 4 : Vieille plantation d'Acacia Nilotica	26
Photo 5 : Pâturage en cours d'invasion par Acacia Nilotica.....	27
Photo 6 : exemples de plaquettes forestières	37

Table des tableaux

Tableau 1 : Données sur l'île Rodrigues (source Statistics Mauritius, 2017)	12
Tableau 2 : Consommation électrique à Rodrigues par classe de consommateurs (source Statistics Mauritius, 2017)	14
Tableau 3: les surfaces des formations forestières de l'île (source : interprétation visuelle des images 2013).....	19
Tableau 4 : Synthèse des gisements estimés par typologie de ressources forestières exploitables à Rodrigues.....	29
Tableau 5 : Energie primaire annuelle correspondant aux gisements estimés en bois à court et long termes.	31
Tableau 6 : Calculs de la puissance électrique d'une centrale approvisionnée par du bois (gisements estimés à court terme)	32
Tableau 7: Grille d'analyse d'une sélection de procédés de combustion et gazéification de biomasse (adapté de ref [49])	35
Tableau 8 : Estimation des coûts d'investissements totaux et annuels d'une plateforme de conditionnement / stockage et d'une centrale électrique / gazéification. Hypothèse d'un subventionnement de 80%	41
Tableau 9 : Estimation des coûts (i) du combustible rendu centrale ; (ii) de production électrique....	42

Résumé exécutif

La présente étude a été commandée par la Commission de l'Océan Indien dans le cadre du programme Energies. L'objectif général était d'évaluer la pertinence d'une filière de production de bioélectricité à partir de ressources ligneuses.

Le travail réalisé par des experts du CIRAD, s'est notamment appuyé sur deux missions à Rodrigues. Des entretiens et enquêtes sur le terrain ont été réalisés auprès (i) des autorités locales ; (ii) des services forestiers ; (iii) des acteurs et parties prenantes des filières et notamment des services forestiers.

Le **diagnostic** technique a porté sur les trois axes suivants :

- Analyse globale du contexte à Rodrigues ;
- Analyse des ressources ligneuses sur le territoire et évaluation des principaux gisements disponibles pour une valorisation énergétique ;
- Evaluation préliminaire d'une filière de bioélectricité : prédimensionnement d'une centrale et identification des opportunités/contraintes concernant son approvisionnement en biomasse et son exploitation ;

Synthèse des principales conclusions

La biomasse représente une réelle opportunité pour Rodrigues dans l'optique de sa politique de transition vers un mix électrique plus autonome et moins carboné. Le potentiel technique, évalué sur une base d'hypothèses très prudentes et durables, représente à court terme :

- 3 000 t de bois sec/an issues essentiellement de l'exploitation des plantations d'Eucalyptus existantes suivant un plan de gestion à mettre en place, et complétées par du bois issu des programmes de restauration des forêts mixtes et d'une exploitation des peuplements anciens d'Acacia Nilotica ;
- 13 000 MWh d'énergie primaire (contenu énergétique du bois), sous la forme de plaquettes forestières ;
- 2 600 MWh d'énergie électrique produite, qui correspondent à une capacité de centrale de l'ordre de 350 kWél.

L'énergie électrique potentiellement produite correspondrait à la consommation moyenne d'environ 1700 foyers rodriguais. La capacité à installer représenterait près de 10 % de la puissance seuil de consommation électrique de l'île Rodrigues. Il s'agirait ainsi potentiellement d'une contribution significative à court terme au mix électrique, avec d'autres services rendus au territoire (création d'emplois, valorisation de ressources forestières existantes, aménagement du territoire...).

Une capacité supérieure peut être envisagée (750 kWél) à plus long terme via (i) une meilleure gestion des plantations actuelles d'Eucalyptus qui pourraient conduire à des gains significatifs de productivité ; (ii) de nouvelles plantations à vocation énergétique, sur des terrains qui restent à identifier.

Les gammes de puissance estimées orientent vers des technologies dites de petite-moyenne puissance.

- Dans ces gammes, les technologies de combustion/cycle vapeur sont peu courantes car économiquement non rentables.

- La gazéification est en revanche une alternative technologique intéressante à la combustion, surtout avec des ressources en bois de type plaquettes forestières. Des solutions sont disponibles, encore peu diffusées dans la COI.

Une possibilité d'organisation de filière à l'échelle territoriale a été proposée, mais doit encore être affinée, notamment concernant les acteurs concernés et la rentabilité technico-économique.

Le potentiel énergétique lié à de futurs plans de lutte/éradication des jeunes massifs d'Acacia Nilotica a été évalué et discuté, mais l'éradication totale à court terme est une opération complexe pour de multiples raisons liées notamment aux moyens à mettre en œuvre et aux incertitudes quant aux itinéraires techniques. Cette ressource n'est pour le moment pas considérée comme durable pour un approvisionnement d'une centrale. Néanmoins, des expérimentations sont encouragées pour bien gérer les espaces facilement accessibles.

Les premières estimations économiques aboutissent à des coûts du combustible rendu centrale compris entre 3,8 et 4,4 MUR/kg (soit environ 100 Euros/tonne de plaquette forestière), et un coût du kWh_{el} sortie centrale compris entre 5,5 et 6,5 MUR/kWh_{el}.

Un projet pilote de petite capacité (50 kW – 100 kW), conçu comme la première phase de la mise en place d'une centrale de plus grande envergure, est recommandé pour initier la construction d'une filière et optimiser les coûts de production.

Recommandations de suites

Dans un premier temps, nous recommandons de poursuivre la dynamique engagée via une **étude de faisabilité** dont les objectifs consisteraient à affiner nos estimations sur :

- 1- le potentiel technique en termes de gisement biomasse :
 - o estimer l'état du massif d'Eucalyptus, évaluer sa productivité à court et moyen terme ;
 - o co-construire avec les services forestiers un plan de gestion long terme du massif et les itinéraires techniques d'exploitation.
- 2- le coût du combustible rendu centrale:
 - o mieux cerner les acteurs potentiels d'une filière d'approvisionnement en biomasse, leurs compétences, leurs capacités d'investissement et d'action, leurs contraintes ;
 - o identifier le site potentiel de la plateforme, affiner les investissements nécessaires, les répartitions entre acteurs ;
 - o consolider l'itinéraire et les coûts d'approvisionnement et de production.
- 3- le coût de production électrique par une analyse technico-économique de la centrale :
 - o Identifier des acteurs/porteurs potentiels (CEB, producteur indépendant de type IPP) ;
 - o Analyser plus finement les offres technologiques, leurs performances, coûts d'investissements, de maintenance.

Dans un second temps, sur les bases de ces études de faisabilité, nous recommandons la mise en place d'un projet pilote dimensionné et conçu pour représenter la première tranche d'une éventuelle future centrale de plus grande envergure. La puissance installée pourrait être entre 50 kW et 100 kW et la biomasse nécessaire de l'ordre de 500-1000 tMS/an. Ce projet pilote permettrait d'initier la construction de la filière à moindre risque, tester des itinéraires techniques, y compris dans des modalités de gestion des ressources et des plateformes techniques, et optimiser les coûts complets de production électrique.

Introduction : contexte & objectifs

1 Contexte de l'étude

1.1 Programme Energies de la COI

La présente étude a été commandée par la Commission de l'Océan Indien dans le cadre du programme Energies. Ce « Programme de développement des énergies renouvelables et d'amélioration de l'efficacité énergétique dans les Etats membres de la COI » est financé par l'Union européenne dans le cadre du 10^{ème} FED (Fonds Européens de Développement). Il vise à (i) faciliter les conditions d'accès au développement, à l'investissement et à la gestion durable des énergies renouvelables ; (ii) augmenter l'efficacité énergétique des différents secteurs économiques.

Dans le cadre du Résultat 1 « Une stratégie régionale de la COI qui se concentre sur le développement des ressources humaines et sur le renforcement des institutions est acceptée et mise en œuvre », des études prospectives ont été menées dans le but d'élaborer la stratégie de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique pour plusieurs petites îles de la sous-région. Suite à ces études prospectives, les parties prenantes de chaque petite île ont sélectionné une action exemplaire illustrative de la problématique énergétique inhérente à sa situation particulière.

La production d'électricité à partir de biomasse ligneuse présente de sérieux atouts pour contribuer à une meilleure autonomie énergétique des états membres de la COI : i) les ressources en biomasse ligneuse, quoique inégalement réparties sur les territoires, sont globalement sous-exploitées ; ii) elle peut constituer une énergie de base ou semi-base et est ainsi complémentaire aux énergies renouvelables intermittentes telles que le solaire et l'éolien dans une perspective d'autonomie énergétique des états membres de la COI ; iii) elle est potentiellement source de revenus complémentaires pour les secteurs agricole et agro-industriel insulaires.

C'est dans la continuité de cette réflexion que la COI a proposé de financer une étude visant à évaluer la pertinence et la faisabilité d'une filière de bioélectricité pour les îles Rodrigues (République de Maurice) et la Digue (Seychelles).

1.2 Objectifs de l'étude – termes de référence

Selon les termes de référence, les objectifs de la présente étude consistent à évaluer la pertinence d'une filière de production de bioélectricité à partir de biomasse ligneuse sur l'île de Rodrigues (Maurice).

Les résultats attendus dans les termes de référence sont les suivants:

- Etat des lieux du gisement en biomasses ligneuses disponibles, avec une attention particulière portée sur les espèces envahissantes, les déchets verts et résidus agricoles ;
- Evaluation de filières de bioélectricité par conversion thermochimique des espèces ligneuses à traiter ;
- Etude préliminaire de dimensionnement d'une unité de production d'électricité, prenant en compte le gisement mobilisable de biomasse ligneuse ;
- Analyse technique et socioéconomique des contraintes et opportunités liées à l'approvisionnement de la centrale associé à des plans d'éradication ou de gestion d'espèces envahissantes.

2 Cadre général et méthodologie

2.1 Description sommaire d'une filière de bioélectricité

Une filière de production d'électricité à partir de biomasse comprend 3 ensembles de processus illustrés sur la figure ci-dessous :

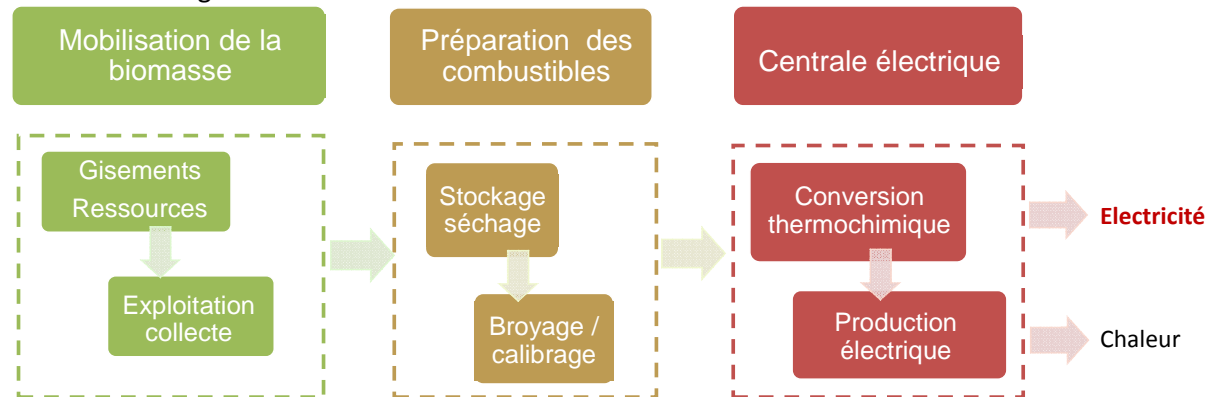


Figure 1 : schématisation d'une filière bioélectricité

1- Production et mobilisation de la biomasse

Il s'agit de toutes les processus de récolte, collecte et transport de la ressource jusqu'à la transformation. Entrent dans le cadre de la présente étude les biomasses dites « ligneuses » ou « lignocellulosiques » : les biomasses forestières, les résidus agricoles et agro-industriels secs, les fractions ligneuses de déchets urbains.

2- Préparation des combustibles

Ce processus comprend l'ensemble des transformations post-récolte nécessaires pour conférer au combustible des propriétés (granulométrie, densité) ou une composition (teneur en humidité) adaptés au procédé sélectionné. En pratique, certaines étapes de préparation des combustibles peuvent être réalisées sur le site de la collecte ou de la centrale électrique, voire sur un site spécifique.

3- La conversion et la production énergétique (centrale)

La centrale électrique comprend des procédés qui permettent de produire, à partir du combustible, de l'électricité et de la chaleur. L'étude se focalisera sur les procédés thermiques (ou thermochimiques) qui sont les plus pertinents pour ces typologies de biomasse en vue de la production d'électricité et/ou chaleur.

2.2 Approche méthodologique

Les choix technologiques et le dimensionnement d'une installation de production de bioélectricité (et plus globalement d'une filière) sont basés selon plusieurs critères

- la demande en électricité (raccordement au réseau ou électrification décentralisée, puissance...) mais aussi en chaleur dans le cas d'une cogénération ;
- la performance et la fiabilité de la technologie de production ;
- l'approvisionnement régulier en biomasse en quantité et qualité maîtrisées ;
- le cadre réglementaire des conditions de collecte de biomasse et de production électrique ;
- les coûts de production sur l'intégralité de la filière

Dans le cadre de la présente étude, l'approche globale a consisté en une première étape d'évaluation par l'amont, c'est-à-dire conditionnée par l'offre en biomasse. L'enjeu majeur était de cerner les

possibilités territoriales d'organisation d'une filière d'approvisionnement en biomasse-énergie d'une éventuelle centrale électrique.

Les diagnostics et évaluations ont porté sur les 4 axes suivants



- 1- Analyse globale du contexte à Rodrigues (politique publique, contexte socioéconomique, énergétique et environnemental, cadre réglementaire, initiatives en cours...)
- 2- Evaluation qualitative et quantitative des gisements disponibles en biomasse ligneuse, avec les données disponibles, prenant en compte
 - a. Un premier diagnostic sur les biomasses produites sur le territoire, les données disponibles concernant les gisements, les itinéraires techniques en place...
 - b. La disponibilité réelle à court/moyen terme de ces ressources, en tenant compte de contraintes d'accès, des usages concurrents, de la saisonnalité, etc.
- 3- Pré-dimensionnement d'une éventuelle centrale électrique, à partir des gisements évalués et analyse préliminaire de possibles orientations techniques.
- 4- Analyse plus globale des contraintes et opportunités de mise en place de filières d'approvisionnement d'une centrale électrique par des ressources ligneuses.

2.3 Les missions à Rodrigues

Ce travail s'est essentiellement appuyé sur une mission des experts à Rodrigues

- Mission du 3-6 décembre 2018 (cf annexe 1) qui visait à faire une analyse préliminaire du contexte Rodriguais
 - o Rencontre des autorités locales, acteurs et parties prenantes concernant les secteurs suivants : environnement, forêt, agriculture, énergie ;
 - o Analyse de l'offre potentielle en biomasses ligneuses (forestières surtout, mais aussi agricoles ou urbaines), collecte des informations disponibles concernant les gisements et les contraintes de mobilisation, les plans de gestion... ;
 - o Analyse de la demande en électricité – opportunités et contraintes de développement d'une filière biomasse-électricité.
- Mission du 25-27 février 2019 (cf annexe 2) dont les objectifs étaient de
 - o partager avec les parties prenantes les premières tendances qui se dégagent de l'analyse faite sur les gisements en biomasse, les scénarios ;
 - o approfondir avec le Service Forestier des repérages terrain de peuplements et les scénarios / itinéraires techniques qui pourraient être envisagés.

Analyse du contexte de l'île Rodrigues

1 Présentation générale

L'île Rodrigues est la plus petite des îles principales des Mascareignes et la plus isolée à l'Est, située à 583 km à l'est de Maurice.

D'origine volcanique, l'île a une superficie de 110 km² (18 km de long sur 8 km de large) et présente la particularité d'avoir un lagon d'une surface deux fois supérieure à celle des terres émergées. La topographie globale est de type montagneux. Le plus haut sommet, le Mont Limon, culmine à 398 mètres.

Le climat est tropical, mais plus sec qu'à Maurice avec une pluviométrie moyenne annuelle relativement faible pour la zone, de l'ordre de 1100mm et inégalement répartie sur le territoire.



La population est de l'ordre de 43.000 habitants (Tableau 1). Les principales activités économiques de l'île sont la pêche, l'agriculture (essentiellement le maïs) et le tourisme. Les secteurs de l'agriculture et de la pêche sont les principaux générateurs d'emplois, comptant pour un peu plus du tiers (33,9 %) des emplois totaux (source Statistics Mauritius, 2015).

Etat	Maurice
Superficie (km ²)	110
Population (hab)	42 818
Densité moyenne (hab/ km ²)	389

Tableau 1 : Données sur l'île Rodrigues (source Statistics Mauritius, 2017)

Rodrigues est une région autonome de la république de Maurice. Le RRA (Rodrigues Regional Assembly) comprend 18 membres. Le Chef Commissaire est désigné par la majorité de l'assemblée et agit en chef du gouvernement, avec l'appui de six autres commissaires nommés. M. J-Richard Payendee est le Commissaire à l'Environnement, Agriculture, Forêts.

2 Contexte énergétique

2.1 Une production électrique fortement dépendante des énergies fossiles

D'après les données dont nous disposons¹, le parc de production électrique est constitué de (i) deux centrales thermiques à moteurs diesel à Port Mathurin (6 MW installés, 5,1 MW effectifs) et Pointe Monnier (6,3 MW) ; (ii) deux parcs éoliens de 1,1 MW (Grenade) et 180 kW (Trefles).

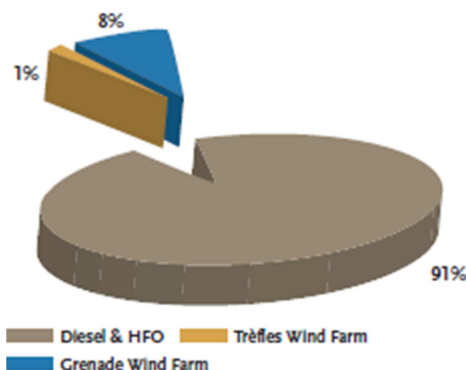


Figure 2 : Mix électrique à Rodrigues – 2011 ¹

Ces données datent de 2011 et doivent être mises à jour. D'après la CEB, le taux d'ENR dans le mix électrique (consommation) serait actuellement de 12%, d'origine éolienne et solaire, dont la part est susceptible d'augmenter avec des projets photovoltaïques.

Il est important de mentionner qu'il n'existe à Rodrigues aucune centrale thermique sur combustible solide, qu'il s'agisse de biomasse ou de charbon fossile, voire en mix comme c'est le cas à Maurice avec les centrales charbon/bagasse.

2.2 Vers le déploiement d'Energies Renouvelables dans le mix énergétique/électrique.

La **RRA (Rodrigues Regional Assembly)** s'est fixée comme cap d'atteindre 100% d'énergies renouvelables à l'horizon 2030. Il s'agit à ce jour d'une vision qui doit encore être déclinée en termes d'objectifs échelonnés. Une feuille de route doit être prochainement précisée (mix électrique seul ou intégrant les carburants, stratégie en termes d'introduction des ENR, calendrier...).

Le **Central Electricity Board (CEB)** est responsable de la production, du transport et de la distribution d'électricité à Rodrigues comme à Maurice. Il est gestionnaire de l'ensemble des installations de production électrique sur le territoire de Rodrigues. Par ailleurs, l'un des rôles de la CEB est de proposer les éléments d'arbitrage économique concernant la stratégie énergétique, en concertation avec l'URA (Utility Regulatory Authority). Le CEB nous a confirmé être partie prenante dans le développement des ENR, conformément à la vision de la RRA d'une part, et de la LTES (Long-Term Energy Strategy) préparée sous l'égide du MEPU. Si la dynamique actuelle en termes d'ENR concerne essentiellement le déploiement du solaire et de l'éolien, une filière bioélectricité pourrait avoir sa place, si les garanties sont données en termes de durabilité et de coût de production.

A ce titre la présente étude permettra d'initier la réflexion quant à la part que pourrait avoir la biomasse dans le mix électrique. Quelques enjeux et points d'attention spécifiques à la biomasse ont été partagés avec les parties rencontrées au cours de nos missions :

- La biomasse est une source d'énergie potentiellement de base, et a un rôle à jouer pour la stabilité du réseau par rapport au caractère intermittent des autres ENR (éolien et solaire).
- La mise en place d'une filière de valorisation énergétique de la biomasse requiert un solide plan de gestion des ressources permettant d'assurer une exploitation durable sur le long terme.

¹ http://ceb.intnet.mu/CorporateInfo/IEP2013/Chapter8_Demand-Supply%20in%20Rodrigues.pdf

- Les procédés de production de bioélectricité requièrent une technicité plus importante que d'autres ENR, ce qui pose d'emblée la question du possible opérateur (CEB ou un producteur indépendant « IPP » comme il en existe à Maurice).

2.3 Analyse succincte de la demande en électricité

Le taux d'électrification sur le territoire est de quasiment 100%. Le réseau électrique de 22 kV couvre l'ensemble du territoire et est non interconnecté avec Maurice (Figure 3). Il y a donc un enjeu fort à développer des solutions de bioélectricité raccordées au réseau, permettant notamment de le renforcer et de garantir une stabilité par rapport aux productions d'énergies intermittentes qui sont vouées à se développer. En ce sens, les solutions bioélectricité présentent l'avantage de reposer sur des machines tournantes à inertie.

La demande en production décentralisée, sans raccordement au réseau (autoconsommation, mini-réseau), nous semble très limitée en raison notamment d'une activité industrielle faible.

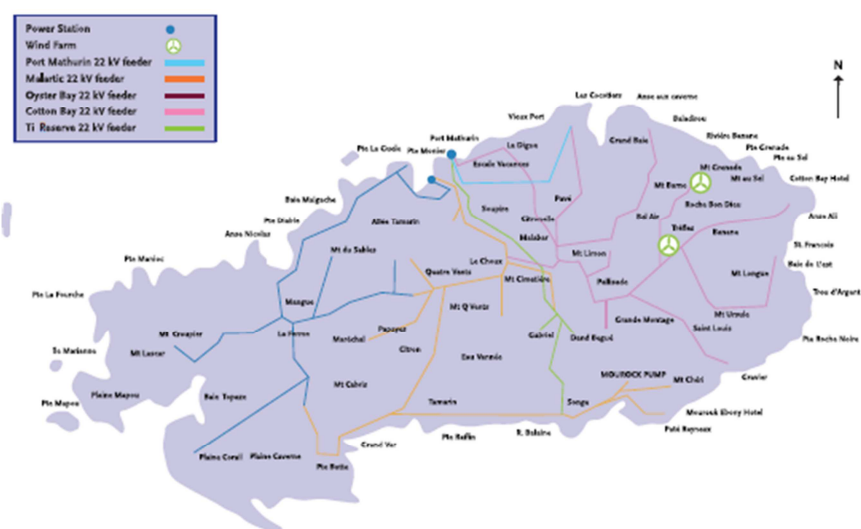


Figure 3 : Réseau électrique à Rodrigues – 2011 – source CEB¹

D'après Statistics Mauritius, la consommation annuelle en électricité est de l'ordre de 35 000 MWh en 2017 (Tableau 2). Les ménages et commerces sont de loin les principaux consommateurs, les besoins industriels sont assez faibles.

Class of consumer	2015		2016		2017	
	No. of consumers	Consumption (MWh)	No. of consumers	Consumption (MWh)	No. of consumers	Consumption (MWh)
Domestic	12 223	18 384	12 582	19 190	12 771	19 832
Commercial	1 344	10 117	1 418	10 400	1 490	11 062
Industrial & Others	289	4 196	297	4 306	311	3 829
All consumers	13 856	32 698	14 297	33 896	14 572	34 723

Tableau 2 : Consommation électrique à Rodrigues par classe de consommateurs (source Statistics Mauritius, 2017)

D'après un entretien avec la CEB, la pointe journalière de consommation serait de l'ordre de 7 MW_{él} en été, et la puissance seuil serait de l'ordre de 3,5-4 kW. Des informations plus détaillées seraient nécessaires pour affiner la demande, notamment la courbe de charge journalière type et des éléments économiques comme le coût actuel de production de l'électricité à Rodrigues. Ces informations ne nous ont pas encore été communiquées à ce jour.

2.4 Cadre réglementaire relatif au raccordement de nouvelles centrales

En République de Maurice, la production d'électricité, y compris à Rodrigues est sous la juridiction du Ministère en charge de l'énergie et des services publics (MEPU). Les réglementations en vigueur et les démarches d'autorisation de raccordement sont centralisées depuis la CEB à Maurice (Connection Agreement, CEB Corporate Planning).

Les Grid Codes doivent être respectés, en fonction de la puissance installée :

- Small Scale Distributed Generation (SSDG) pour les puissances < 50kW, en vue d'une connexion au réseau basse tension.
- Medium Scale Distributed Generation (MSDG) pour les puissances 50-200 kW ou 200 kW-2 MW, en vue d'une connexion au réseau moyenne ou haute tension.

Ce cadre réglementaire devra être exploré plus en détail, dans le cas d'une éventuelle étude de faisabilité approfondie.

2.5 Une demande limitée en chaleur sur le territoire

Identifier un besoin de chaleur régulier pourrait permettre d'envisager un système de cogénération (électricité + chaleur) au lieu d'un simple système de production électrique.

Or, il existe peu de transformation agro-alimentaire à Rodrigues nécessitant des besoins en chaleur (par exemple séchage, distillation d'huiles essentielles...). Actuellement, les solutions solaires sont préférées pour la mise en place de systèmes de séchage, mais la cogénération peut constituer une opportunité pour apporter un service supplémentaire à la production électrique, si une demande claire est anticipée.

3 Contexte environnemental : lutte contre les espèces invasives

3.1 Initiatives et programmes

La lutte contre les espèces invasives sur l'île de Rodrigues est une préoccupation majeure de la RRA, avec des enjeux aussi bien environnementaux (préservation de la biodiversité, lutte contre l'érosion, impact sur la disponibilité en eau) que socio-économiques (nuisances aux populations, envahissement de terres agricoles). Les enjeux majeurs mis en avant sont les suivants :

- « Changer la forêt » en remplaçant progressivement les arbres exotiques et les formations forestières associées par des espèces indigènes ou endémiques

Plusieurs projets de restauration ont été menés ou sont en cours sur des sites variés de Rodrigues. Ainsi de tels processus de restauration ont déjà été testés par les services forestiers et l'ONG Mauritius Wildlife Foundation (MWF) et mis en application sur trois sites de l'île : dans la réserve de Grande Montagne (20 ha ont déjà été restaurés) ; à Anse Quitor (2 ha) ; et Cascade Pigeon (15 ha). A ce jour, le bois des arbres exotiques est en majorité laissé sur site et représente donc une ressource ligneuse disponible pour une production énergétique.

- Eradiquer les espèces invasives, et tout particulièrement l'Acacia Nilotica (« piquant loulou ») notamment pour récupérer les terres agricoles qui sont peu à peu envahies.

L'Acacia Nilotica s'est en effet très largement répandu dans les parties basses de l'île, à des degrés divers d'envahissement qui sont encore peu documentés. Plusieurs programmes de lutte contre l'Acacia Nilotica ont été portés par la Commission de l'Environnement et le MWF, au cours desquels divers protocoles et itinéraires techniques ont été testés. Les résultats obtenus sont variables et ces programmes nécessitent des moyens très importants. La question reste posée quant au meilleur compromis entre la volonté d'éradication et la gestion des peuplements pour contrôler l'invasivité.

3.2 Acteurs

Deux institutions mettent en oeuvre les programmes de restauration des forêts et de gestion d'Acacia Nilotica à Rodrigues. Le Mauritian Wildlife Foundation (MWF) met en oeuvre des programmes dédiés sur certains sites importants cités ci-dessus pour la restauration de la flore indigène, en particulier des réserves naturelles strictes. Le bureau des forêts de l'Assemblée Régionale de Rodrigues (Forestry Services of the Rodrigues Regional Assembly) est mobilisé depuis plusieurs années pour la lutte contre les espèces envahissantes et la réintroduction de la flore indigène.

Ces deux institutions jouissent de la collaboration étroite des communautés locales de l'île, y compris au moyen des contrats de travail occasionnel avec des groupes communautaires, qui travaillent à la fois sur les terres domaniales (Etat) et les terrains communautaires. La RRA souligne sa volonté de voir perdurer sur le long terme les programmes initiés et d'impliquer les communautés dans les projets (pépinières).

Analyse des gisements disponibles en biomasse ligneuse

Cette partie rassemble les informations et données collectées lors des missions ou produites par les experts, permettant d'estimer les gisements en ressources ligneuses disponibles pour une production d'énergie à court ou moyen terme.

La disponibilité en biomasse pour la production d'énergie s'apprécie au regard de plusieurs critères d'aptitude biophysique, d'accessibilité, de faisabilité technique mais aussi de durabilité. Nous nous sommes efforcés de prendre en compte ces critères dans cette évaluation, dans la limite des informations disponibles.

1 Etat des lieux général des ressources ligneuses sur le territoire

1.1 Ressources forestières

La forêt native de l'île Rodrigues a été entièrement détruite au 19ème siècle. Cependant, un vaste programme de reforestation a été initié à la fin de la seconde guerre mondiale et aujourd'hui l'île compte plus de 4 000 ha de surfaces forestières (sur un total de 10 500 ha). Les formations forestières sont toutes composées d'espèces « exotiques » à croissance rapide : *Acacia nilotica*, *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus tereticornis*, *Terminalia catappa*, *Syzygium jambos*, *Pongamia pinnata*.

L'inventaire forestier réalisé en 2002 recense environ 1600 ha de forêts gérées par l'Etat. Les Services Forestiers y distinguent deux grands types de forêts : les plantations d'Eucalyptus (*Eucalyptus tereticornis*) et les forêts matures en mélange. L'inventaire forestier estimait le stock sur pied (en bois rond) à 108 m³/ha dans les peuplements d'Eucalyptus et à 128 m³/ha dans les forêts matures. Ces forêts ne sont plus exploitées pour leur bois. Néanmoins une petite production privée de charbon de bois et de perches d'Eucalyptus pour la construction existe encore.

Par ailleurs, à la fin des années 1980, un programme de lutte contre la déforestation et l'érosion des zones côtières a créé 90 ha de plantation d'*Acacia Nilotica* en divers endroits de l'île. Aujourd'hui par l'effet de la déprise agricole et de l'élevage extensif (qui dissémine les graines), cette espèce s'est très largement répandue dans les parties basses de l'île et on peut estimer à plus de 800 ha les surfaces envahies à des degrés divers.

Au vu de l'ensemble de ces éléments (surfaces et stocks importants, absence d'exploitation forestière concurrente), les ressources forestières représentent a priori une ressource majeure pour une production énergétique.

1.2 Déchets verts ligneux

Les déchets verts issus d'entretiens d'espaces verts particuliers ou collectifs comprennent une fraction ligneuse (branches, tailles de haies, ...) qui pourrait potentiellement être utilisée pour une production d'énergie. A Rodrigues, comme dans la plupart des zones tropicales, les déchets verts peuvent représenter d'importants volumes, qui plus est après des événements cycloniques comme ceux récemment subis par l'île au cours de l'été austral 2019.

Cependant, à ce jour la ressource en déchet verts ligneux réellement disponible pour une valorisation énergétique nous semble très limitée en raison de l'absence d'un système de collecte adapté. Il n'existe pas de tri sélectif à Rodrigues et il n'existe pas de déchetterie.

- Les déchets verts de particuliers ne sont pas collectés et la pratique des particuliers consiste soit à les brûler, soit à les composter en vue d'une réutilisation individuelle, soit à les laisser se dégrader dans leur jardin.
- Les déchets verts issus de l'entretien des parcs publics et des bords de route, sont acheminés sur un centre de stockage unique (non visité) où ils devraient être broyés. Mais actuellement (i.e. au moment des missions sur place) le broyeur est en panne.

Le stock de déchets verts n'est aujourd'hui pas connu et difficile à évaluer. Il ne peut être considéré comme disponible à court terme car il requiert la mise en place d'un système de collecte/tri adapté qui permette de garantir une qualité de combustible et un approvisionnement régulier pour une potentielle nouvelle centrale électrique.

Néanmoins, il pourrait représenter à l'avenir une ressource complémentaire de la ressource forestière qui sera abordée en fin de rapport.

1.3 Ressources agricoles

La ressource agricole (résidus lignocellulosiques de récolte) et agro-alimentaire est pratiquement inexistante. La seule production locale qui aurait pu fournir une biomasse est le maïs (*Zea mays*) qui occupe pratiquement tout l'espace agricole (80% des surfaces cultivées) mais d'une part cette production est faible et dispersée et d'autre part la totalité de la plante est déjà utilisée pour l'alimentation humaine ou animale : grains + feuilles + tiges. Les vergers ne font pas l'objet de tailles qui auraient pu fournir de la biomasse ligneuse.

Il n'existe quasiment pas de transformation agro-alimentaire sur l'île. Les seules unités recensées sont, à notre connaissance : une petite unité production artisanale d'huile de coco (200 cocos/an), une unité d'extraction d'huile essentielle de Limon, une unité de production de farine de manioc. Ces unités ne génèrent cependant pas assez de déchets secs susceptibles d'alimenter une unité bioélectrique. Par ailleurs les surfaces agricoles en produits vivriers ont tendance à diminuer, en raison d'une baisse générale de la pluviométrie depuis environ 15 ans.



Photo 1 : les paysages agricoles et forestiers de l'île

Ainsi, il apparaît que la ressource ligneuse issue des forêts domaniales et autres terres boisées de l'Etat est aujourd'hui la seule source potentielle de biomasse susceptible d'alimenter durablement et à court terme une centrale électrique à biomasse.

La chapitre suivant détaille les conditions de production de cette biomasse et en estime les quantités disponibles.

2 Analyse des ressources forestières de l'île

L'enjeu du travail a consisté à

- répertorier et cartographier les typologies de formations forestières sur l'île et d'en évaluer les superficies (ha) ;
- sélectionner les formations potentiellement exploitables à court terme ou plus long terme pour une valorisation énergétique et estimer les gisements mobilisables, dans la limite des informations disponibles, par des hypothèses d'itinéraires techniques.

Les résultats seront exprimés à ce stade en tMS/an (tonne de matière sèche par an). Ces données seront retranscrites en potentiel énergétique (électrique) dans la partie suivante.

2.1 Cartographie des formations forestières

Au cours de la présente étude, une carte des ressources forestières de l'île a été réalisée par interprétation visuelle d'une image SPOT 6 datant de décembre 2013 disponible sur Google Earth. Seule cette image permettait une couverture totale de l'île sans nuage.

La méthodologie a été la suivante :

- 1- L'image dans un premier temps été segmentée selon la couleur du couvert forestier, sa texture et sa densité.
- 2- Dans un deuxième temps, plus de 50 points de vérification de terrain ont été pris durant la seconde mission du 24 au 27/02/2019.

Ce travail a permis de discriminer 7 grandes classes de formations forestières :

- Les formations à *Acacia Nilotica* en peuplement presque pur
- Les plantations d'*Eucalyptus* en peuplement presque pur (*Eucalyptus tereticornis*)
- Les formations mixtes à dominantes d'*Eucalyptus* (*Eucalyptus tereticornis*)
- Les plantations de Filao en peuplement presque pur (*Casuarina equisetifolia*)
- Les forêts en mélange, *Syzygium jambos* (Jambrozoa), *Pandanus heterocarpus*, *Pongamia pinata*, *Cassine orientalis*, *Albizia lebbbeck*, etc. ;
- Les forêts rivulaires en mélange où *Albizia lebbbeck* est très présent.
- Les mangroves (*Rhizophora microlata*)

Les surfaces recensées sont données dans le Tableau 3 ci-après.

Formation	Surface en ha
Formations à <i>Acacia Nilotica</i>	1080
Formations mixtes à dominante d' <i>Eucalyptus</i>	430
Plantations d' <i>Eucalyptus</i>	679
Plantations de Filao	101
Forêts en mélange	1717
(dont zone de restauration programmée)	(780)
Forêts rivulaires en mélange	204
Mangroves	30
Total	4241

Tableau 3: les surfaces des formations forestières de l'île (source : interprétation visuelles des images 2013)

L'inventaire forestier effectué en 2003 recensait quant à lui 547 ha de plantations d'eucalyptus et 1025 ha de forêts en mélange. Mais les surfaces recensées et inventoriées ne comprenaient ni les parcelles privées, ni les plantations d'Acacia, ni les plantations de Filao.

Les surfaces forestières relevées sur l'image de 2013 sont donc bien supérieures à celles inventoriées en 2003. Cette différence s'explique par la prise en compte des formations sur le domaine privé (près de 20% des surfaces totales), mais également par une expansion naturelle des formations forestières (acacia, eucalyptus, albizia) sur certains coteaux, dans les fonds de vallées et sur les espaces pastoraux.

La carte (figure 4) présentée ci-après recense l'ensemble des formations forestières détectées. Sur cette carte ont également été reportées les zones de restauration prioritaire définie par les Service Forestier.

Enfin, pour chacune de formations forestières (polygones saisis) ont été calculés les paramètres d'exploitabilité suivants :

- Pente minimum, maximum et moyenne
- Distance la plus proche à la route ou à la piste praticable

Les cartes de ces paramètres sont données en annexe.



2.2 Les ressources exploitables à court terme

Trois typologies de ressources nous semblent exploitables à court et moyen termes en vue d'une valorisation énergétique :

- Les plantations d'Eucalyptus
- Les résidus d'exploitation des chantiers de restauration des forêts en mélange
- Les plantations à Acacia Nilotica

2.2.1 Les plantations d'Eucalyptus

Etat des lieux et analyse des conditions d'exploitation

L'Eucalyptus a été introduit à Maurice et dans les autres îles des Mascareignes au début du 19ème siècle. Sur Rodrigues, son essor a été particulièrement important à partir des années 1970 (Kueffer and Mauremootoo, 2004). Même si on peut y trouver *E. Grandis*, *E. tereticornis* y est largement dominant. Cet Eucalyptus a été choisi pour sa résistance à la sécheresse (Pmoy annuelle > 500 mm) et aux vents violents (jusqu'à 160 km/h).

Les plantations d'*E. tereticornis* représentent à Rodrigues environ 600 ha presque uniquement sur le domaine de l'Etat. La densité de plantation y est d'environ 1000 tiges/ha (espacement 2m x 2m). Par ailleurs, il semble que l'Eucalyptus ait naturellement colonisé certains espaces hors des plantations initiales où on peut le retrouver en formation avec *Acacia Nilotica* ou *Albizia lebeck*.



Photo 2 : Massif d'Eucalyptus mené en taillis

1/3 des plantations sont situées sur des pentes inférieures à 30% facilement accessibles et les 2/3 restantes sont situées sur des pentes entre 30% et 60% permettant une exploitation manuelle ou mécanisée avec des engins spéciaux.

95% des plantations sont situées à moins de 500m d'une route ou d'une piste praticable existante.

Aujourd'hui les plantations sont très largement sous-exploitées. Elles servent essentiellement à la production de tiges pour la construction (environ 15 000 tiges/an selon les services forestiers, soit l'équivalent de 15 ha sous exploitation) et à la production de miel très recherché des habitants. Ces usages peuvent aisément être conciliés avec l'exploitation potentielle de ces formations à des fins énergétiques.

- ➔ Au total, on peut considérer que l'ensemble des plantations est exploitable manuellement et que l'on peut en retirer la quasi-totalité des tiges.
- ➔ On retiendra néanmoins que 20% du massif ne sera pas exploité à des fins de bois-énergie pour des raisons diverses : exploitation pour bois de construction, inaccessibilité, parcelles abimées, trop fortes pentes...)

Estimation du potentiel disponible en biomasse-énergie

Afin de produire du bois-énergie, ces plantations peuvent être menées en taillis à très courte rotation (rotation de 5 à 7 ans environ sur des cycles de 4 à 5 rotations). La capacité de rejet d' *E. tereticornis* est excellente, avec individualisation rapide de 2 à 3 brins d'avenir par souche sans besoin de dépressage (Sims et al., 1999).

D'après la littérature, la productivité en bois-énergie (tronc + branches) de telles plantations dans la sous-région dans des conditions proches de celles rencontrées à Rodrigues se situe entre 5 tMS/ha/an et 13 tMS/ha/an (avec un essai observé à 25 tMS/ha/an) (Adegbehin et al., 1988; Ahimana and Maghembe, 1987; Chapola et al., 1995; Pima et al., 2016; Ugalde and Pérez, 2001; Verhaegen et al., 2014).

D'après l'inventaire forestier de 2003, le stock moyen de bois rond sur pied de ces plantations serait de 108 m3/ha, soit environ 60 tMS/ha de bois rond (densité mesurée 0.56 tMS/m3) et 90 tMS/ha de bois-énergie (en prenant un facteur d'expansion de la biomasse de 1.5 selon la littérature). Cela correspondrait sur 7 ans à un taux de prélèvement de l'ordre de 13 tMS/ha/an sans mettre en péril la pérennité du gisement.

Pour nos estimations, nous retiendrons dans un premier temps une hypothèse prudente de productivité de l'ordre de 5 tMS/ha/an exploitables car le massif n'a pas fait l'objet d'un plan de suivi et de gestion de longue date et certaines parcelles peuvent avoir été abimées par les cyclones, le feu ou une exploitation trop intensive. Au vu des conditions bioclimatiques de Rodrigues, la productivité du massif pourra progressivement être améliorée par une bonne gestion et par une amélioration du matériel génétique, ce qui nous amène à une hypothèse de l'ordre de 10 tMS/ha/an sur du plus long terme.

Ainsi sur une période de 30 ans (au bout de laquelle il faudra renouveler les plantations) la quantité de biomasse disponible à court terme serait de l'ordre de 2400 tMS/an (hypothèse basse).

Ce potentiel pourrait être progressivement augmenté à 4800 tMS/an par amélioration de la gestion du massif et remplacement du matériel végétal ancien.

2.2.2 Les résidus d'exploitation des chantiers de restauration des forêts en mélange

Etat des lieux et analyse des conditions d'exploitation

L'hypothèse retenue ici est la poursuite du programme de restauration engagé par la Commission de l'Environnement de Rodrigues, consistant à remplacer les arbres exotiques et les formations forestières associées par des arbres endémiques ou indigènes. A ce jour, le bois des arbres exotiques est laissé sur site et représente donc une ressource ligneuse disponible pour une production énergétique. Seuls ces résidus sont considérés comme source potentielle de biomasse énergie. Aucun prélèvement d'espèces indigènes/endémiques n'est ici envisagé.

D'après le Service Forestier :

- environ 780 ha seraient à restaurer en priorité (cf figure 4) ;
- le rythme actuel de restauration est de l'ordre de 10-15 ha/an.

La restauration est donc un chantier très ambitieux qui pourrait s'étaler sur une cinquantaine d'années. Les résidus de restauration pourraient ainsi représenter un complément de ressource non négligeable.



Photo 3 : Massif de forêt mature en mélange en cours de restauration

Néanmoins, de nombreuses questions restent posées quant aux itinéraires techniques d'exploitation et exportation du bois.

- Dans un souci de réduction des impacts sur les sols, les écoulements et la flore indigène, la collecte devra se faire manuellement. Il semble ainsi difficile de sortir les gros bois et de travailler sur de fortes pentes. Or certains sites : Cascade St Louis, Mourouk, Malgache, présentent de fortes pentes, parfois au-delà de 100% et seront donc difficile à exploiter. L'analyse du terrain montre que 20% des surfaces de ces sites présentent des pentes supérieures à 60%.
 - ➔ En évitant les fortes pentes (> 60%) et les bas fonds, la surface pratiquement exploitable serait de l'ordre de 500 ha.
- L'avenir des gros arbres (diam > 35 cm) ne semble pas clairement défini dans le schéma de restauration : doit-on les enlever ou pas au risque d'ouvrir trop largement la forêt et d'engendrer des dégâts d'abatage ? D'après l'inventaire forestier de 2003, ces gros arbres concernent essentiellement les *Eucalyptus tereticornis*, *Cassine orientalis* (bois d'olive), *Mangifera indica* (manguiers), *Terminalia arjuna*, *Araucaria*, etc. Ces gros arbres représentent plus de 25% du volume sur pied.
- Enfin, une partie de la biomasse (feuilles, petites branches) devra rester au sol après abattage, afin de protéger ce dernier des risques d'érosion et participer à sa fertilité.
 - ➔ Ainsi on supposera que seul le tronc principal pourra être exporté.

Estimation du potentiel disponible en biomasse-énergie

L'inventaire forestier estime à 128 m³/ha le stock de bois rond sur pied contenu dans ces forêts, hors houppiers, branches et feuilles. En supposant une densité moyenne de biomasse sèche de 0.56 tMS/m³ de bois frais (chiffre retenu par défaut par la FAO en Afrique), le stock sur pied total serait donc de 70 tMS/ha. Hors gros arbres (Diam > 35 cm) ce stock se réduit à 50 tMS/ha et nous

retiendrons ce chiffre comme potentiel exploitable. Ce chiffre nous semble néanmoins un peu surestimé et de nombreuses zones envahies de *Pongamia* ou *Jatropha* semblent présenter des stocks inférieurs. Nous retiendrons plutôt le chiffre de 40 tMS/ha comme potentiel exploitable.

En considérant le rythme indiqué par les services forestiers (15 ha/an), les résidus de restauration pourraient représenter un complément en biomasse de 600 tMS/an pendant 40 ans. Cependant, compte tenu des aléas potentiels : disponibilité de main d'œuvre, cyclones, financement des projets de restauration, nous retiendrons une hypothèse prudente de 10 ha/an.

Ainsi à court terme, le complément serait raisonnablement de l'ordre de **400 tMS/an sur 40-50 ans.**

2.2.3 Les formations à *Acacia Nilotica*

Etat des lieux et analyse des conditions d'exploitation

L'*Acacia Nilotica* est une espèce qui a fait l'objet d'un vaste programme de plantation à Rodrigues de 1975 à 1989. L'objectif de cette opération était de créer une couverture forestière pour lutter contre l'érosion des sols dans les parties basses et sèches de l'île qui faisaient l'objet d'une déprise agricole. En 1975, 83 ha ont été plantés par le service forestier à une densité de 1600 arbres/ha. En 2005, le Service Forestier estimait à 187 ha la surface couverte. Aujourd'hui, selon l'interprétation des images satellitales, la surface couverte peut être estimée à environ 1000 ha. Néanmoins ce chiffre comprend des formations aux densités très variables : seulement 100 ha ont une forte densité (plantations initiales des années 1980 avec plus de 1000 arbres/ha), 300 ha auraient une densité moyenne (zones colonisées anciennes avec plus de 150 arbres/ha) et 600 ha seraient très clairsemés (zones en cours de colonisation avec entre 50 et 100 arbres/ha).

Cet arbre est très envahissant. Ses graines en quantité très abondante sont propagées essentiellement par les animaux d'élevage (bovins, caprins, ovins) et l'arbre rejette très largement de souche. L'*Acacia* est peu apprécié de la population locale car c'est un arbre très épineux et très difficile à contrôler manuellement. Néanmoins son feuillage est apprécié par les ovins et les caprins et il constitue donc un fourrage de réserve en saison sèche. Il envahit les vallées et les collines, principalement aux altitudes comprises entre 0 et 100m, et forme des massifs denses, monospécifiques, dont l'ombrage sombre ne permet pas le développement d'une strate herbacée.

Ainsi si l'*acacia* peut représenter une source de fourrage dans son stade jeune et en situation de faible densité, au stade adulte son envahissement dégrade fortement les pâturages.

L'éradication de l'*acacia*, comme sa gestion, sont des problèmes complexes pour plusieurs raisons :

- Aujourd'hui le stock de graines disséminées par les animaux et contenu dans le sol est aujourd'hui très important et son potentiel de développement est donc très grand ;
- L'*acacia* est une espèce très héliophile. Ainsi l'ouverture du milieu favorise sa germination et son expansion. La destruction des individus adultes conduit donc à une germination et une colonisation accélérées des jeunes ;
- L'*acacia* pousse dans des zones sèches, dans des conditions de relief et de sols difficiles, et où les alternatives sont limitées ;
- L'*acacia* a été planté pour protéger le sol contre l'érosion et son éradication brutale en laissant le sol à nu pourrait conduire à une reprise accrue de l'érosion ;
- L'*acacia* est une source de fourrage en saison sèche pour les ovins et les caprins et est apprécié par les éleveurs dans certaines zones arides de l'île, même si la grande majorité des rodriguais le considèrent comme un nuisible ;
- L'*acacia* est une plante très épineuse qui demande un travail délicat lors de tout traitement manuel : taille, éclaircies, coupe...

En 2005, le service forestier avait déjà établi un programme de contrôle et d'éradication progressive de cette espèce. Il s'avère que ce travail est très demandeur en main d'œuvre et qu'il nécessite d'être différencié selon les zones et l'âge des formations.

A court terme seule l'exploitation des vieux peuplements (plantations des années 1980) semble envisageable.

Dans les vieilles plantations denses (environ 100ha) l'exploitation des peuplements pourrait se faire par la taille des arbres et des éclaircies manuelles au taux de 50% environ. Néanmoins un plan de gestion et de contrôle global à l'échelle de l'île serait également à prévoir afin de combiner le contrôle de l'envahissement et la production de bois-énergie. Quelques pistes sont évoquées dans le chapitre ci-après.



Photo 4 : Vieille plantation d'Acacia Nilotica

Estimation du potentiel disponible en biomasse-énergie

L'estimation de la biomasse disponible suite à ces traitements est difficile en l'absence de mesures in situ et de références bibliographiques. Néanmoins, les quelques références existantes font état de volumes sur pied, pour des plantations de 20 à 25 ans dans des conditions de 500mm à 800mm de pluie annuelle, compris entre 50 m³/ha sur les sols les plus pauvres et 200 m³/ha sur les sites les plus riches et avec éclaircies après 5 ans (Goda, 1986; Indian Council of Forestry Research and Education, 2015; Maguire et al., 1990; Tewari and Singh, 2006).

➔ On retiendra le chiffre de 50 m³/ha pour les plantations anciennes de Rodrigues, soit 37 tMS/ha (densité de 0.75 kg MS/m³).

Les volumes que l'on pourrait collecter lors des éclaircies et la taille de ces massifs seraient de l'ordre de 3 m³/ha/an soit 2.2 tMS/ha/an. Mais ces estimations sont très incertaines et il serait nécessaire de mener un inventaire général des espaces plantés et envahis sur toute l'île ainsi que des mesures de biomasse.

Les produits de la gestion des vieux massifs d'acacia pourraient donc représenter à court terme un complément en biomasse de l'ordre de 200 tMS/an (100 ha).
--

2.3 Les ressources exploitables à plus long terme

Dans le contexte de Rodrigues, deux types de ressources nous semblent exploitables à plus long terme:

- Les espaces de pâturage envahis par l'Acacia Nilotica
- De nouvelles plantations forestières à but énergétique.

2.3.1 Les espaces de pâturage envahis par l'Acacia Nilotica

Comme indiqué dans la partie précédente, actuellement plus de 900 ha auraient été envahis entre 1990 et 2014 et ce chiffre est certainement sous-estimé au vu des visites de terrain faites récemment. La partie Ouest de l'île semble particulièrement touchée par ce phénomène.

300 ha auraient déjà atteint une densité moyenne (zones colonisées anciennes avec plus de 150 arbres/ha) et 600 ha seraient encore clairsemés (zones en cours de colonisation avec entre 50 et 100 arbres/ha).



Photo 5 : Pâturage en cours d'invasion par Acacia Nilotica

Comme nous l'avons également évoqué précédemment l'éradication totale de l'Acacia Nilotica demanderait beaucoup de temps et de moyens sans garantie de résultat. Un contrôle de l'envahissement, combinant pastoralisme et production de bois-énergie semble une solution plus raisonnable.

Dans le contexte de l'île les grands principes d'un tel mode de gestion sont :

- Maintenir une densité d'arbres suffisamment faibles pour laisser la strate herbacée se développer et offrir du fourrage aux animaux. Acacia Nilotica étant une légumineuse, il permet d'enrichir le sol et d'améliorer les pâturages. La densité d'arbres est maintenue par des éclaircies régulières et un contrôle de la régénération, soit par des animaux mangeant les jeunes plantules, soit par des travaux humains de nettoyage mécaniques (gyrobroyage) ou manuel ;
- Maintenir un couvert dans les zones de fortes pentes propices à l'érosion ;
- Permettre une exploitation aisée de la ressource arborée.

En pratique, les techniques de gestion de la ressource dans l'espace et le temps peuvent être très variables. Il existe de par le monde différentes solutions ayant été testées pour ce type de gestion de l'espace sylvo-pastoral. Néanmoins il n'existe pas de solution type et un tel plan de gestion demande une étude approfondie complémentaire. Les solutions dépendent de l'implication des éleveurs, de leurs pratiques de pâture, des possibilités de mécanisation (accessibilité, pentes...), des moyens alloués au contrôle de la régénération et des objectifs de production fixés (en quantité et en types de biomasse à produire).

Au final, la densité d'arbres ne devra pas dépasser 200 arbres/ha et un taux de couvert < 30%. Dans un tel système, les productivités ligneuses pourraient être de l'ordre de 1 m³/ha/an, soit 0.75 tMS/ha/an sur des cycles d'exploitation de 10 ans environ (Audru et al., 1991; Goda, 1986). Les surfaces exploitables selon ce mode de gestion restent à déterminer. Mais en se limitant aux espaces facilement accessibles (pâturages de faibles pentes à de l'Ouest et de l'Est de l'île), on peut estimer à 400 ha la surface potentielle. Ainsi, en théorie l'exploitation de ces espaces sylvo-pastoraux pourrait représenter à long terme un complément en biomasse de l'ordre de 300 tMS/an (400ha).

A ce jour, la mise en place d'une telle gestion des peuplements semble exclue par la Région qui a confirmé aux experts sa volonté de mener un programme d'éradication dans les plus brefs délais possibles et prévoirait d'investir dans des moyens techniques de type gyrobroyeur sur excavatrice. Les experts n'ont pas de visibilité quant à la possibilité de produire des combustibles bois de qualité acceptable par ces modalités d'exploitation, qui sont susceptibles de conduire à des broyats très hétérogènes

Aussi, compte tenu de la très forte incertitude sur la conduite de ces formations et de la volonté de la Région d'éradiquer progressivement l'Acacia, on ne peut donc considérer cette ressource comme un complément d'approvisionnement potentiel et durable de la centrale.

2.3.2 Des nouvelles plantations forestières à but énergétique

90% des terres de Rodrigues appartiennent à l'Etat qui dispose donc d'une large réserve foncière pour de nouvelles plantations, soit en gestion directe soit en régie.

Créer des plantations énergétiques dans un futur à définir, peut être une solution réalisable pour sécuriser l'approvisionnement d'une centrale, en augmenter la production et mieux en maîtriser les coûts.

Une tentative récente de création par les services forestiers d'un nouveau massif forestier d'environ 100 ha dans l'Ouest de l'île s'est soldée par un échec, en particulier à cause du manque d'acceptation d'un tel projet par les éleveurs locaux. Néanmoins, un tel échec mériterait d'en tirer les enseignements nécessaires pour trouver des solutions de plantation et de gestion, sans doute mieux adaptées aux pratiques des éleveurs et mieux appropriées par les populations locales.

Des plantations en mélange, à usages mixtes : ombrage, fourrage et bois-énergie seraient à étudier.

Une plantation de 100 ha bien menée pourrait apporter de l'ordre de 500 tMS/an à 1000 tMS/an supplémentaires à la centrale.

2.4 Synthèse des ressources exploitables : gisements estimés et contraintes

Le Tableau 4 rassemble les gisements évalués par typologie de ressource, ainsi que les atouts et faiblesses à prendre en compte.

Ressources exploitables	Potentiel estimé (tMS/an)	Forces	Faiblesses
Court/moyen terme			
Plantations d'Eucalyptus	2400	Ressource connue Plantations déjà existantes mais sous-exploitées Pas de concurrence avec les usages actuels (miel, tiges...)	Plantations anciennes dont l'état doit être mieux évalué Besoin de renouvellement à considérer
Restauration forêts mixtes	400	Bois exotiques non exploités à ce jour	Itinéraires techniques incertains Productivité liée aux programmes de restauration
Acacia Nilotica - peuplements anciens	200	Anciennes plantations plus facilement exploitables que les espaces envahis	Stocks actuels en biomasse (tMS/ha) à valider
Total court terme	3000		
Compléments à plus long terme			
Amélioration des plantations d'Eucalyptus	+ 2400	Matériel génétique adapté aux conditions de Rodrigues Pérennité du gisement	Investissement à prévoir
Acacia Nilotica – dans les espaces sylvopastoraux	-	Contrôle de l'expansion et compatibilité avec l'élevage	Fortes incertitudes sur les techniques d'exploitation Volonté politique d'éradication
Cultures énergétiques	+ 800	Foncier disponible Plantations adaptées à une exploitation à moindre coût	Comptabilité avec l'élevage ?
Total long terme	+ 3200		

Tableau 4 : Synthèse des gisements estimés par typologie de ressources forestières exploitables à Rodrigues

On retiendra donc comme ordre de grandeur un gisement disponible à court/moyen terme en bois-énergie de l'ordre de 3000 tMS/an, issu majoritairement de l'exploitation des plantations d'Eucalyptus et complété par des ressources ligneuses issues de la restauration de forêts et l'exploitation de peuplements anciens d'Acacia Nilotica.

A plus long terme, un gisement potentiel complémentaire évalué à environ 3200 tMS/an de bois-énergie pourrait être issu (i) d'une meilleure gestion du massif d'Eucalyptus, en remplaçant progressivement le matériel génétique et en respectant des règles de coupe à faible impact ; (ii) de nouvelles plantations forestières à but énergétique. Le gisement à long terme est donc potentiellement le double du gisement actuel.

En revanche, l'exploitation d'espaces de pâturage envahis par l'Acacia Nilotica, dans une logique d'éradication à court terme ne peut être considérée comme une source durable de biomasse énergie.

Evaluation préliminaire d'une filière de bioélectricité

Cette partie vise à

- Estimer en première approche la capacité d'une centrale électrique approvisionnée par les gisements sélectionnés dans la partie précédent ;
- Proposer quelques orientations techniques, en vue d'une étude de faisabilité approfondie.
- Identifier les opportunités/contraintes techniques et territoriales concernant les différents maillons de la filière (Figure 5).

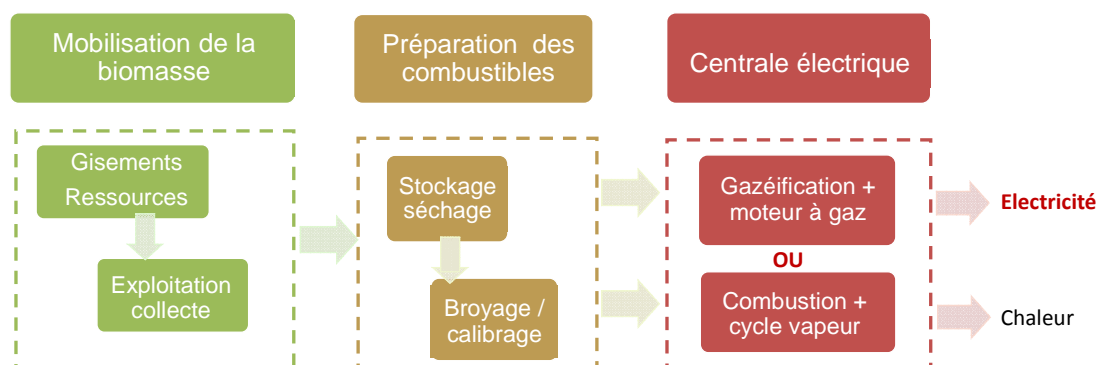


Figure 5 : Les procédés de gazéification et combustion dans une filière bioélectricité

1 Pré-dimensionnement d'une potentielle centrale électrique

1.1 Energie primaire disponible

1.1.1 Hypothèses retenues - combustible

La ressource énergétique exclusive pour la centrale est le bois. Son contenu énergétique, mesurable par son Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI), dépend de son humidité, de sa composition organique et en minéraux.

Le PCI d'un bois est en fait peu dépendant de l'essence considérée. Il est en moyenne de l'ordre de 5100 kWh/t sur base totalement anhydre pour un feuillu. Nous retiendrons par la suite un **PCI de 4350 kWh/t**, pour un bois dit sec à 13% d'humidité (cette valeur représentative d'un séchage en conditions ambiantes sera notre référence pour la suite). A noter que le PCI d'un bois plus humide serait plus faible, ce qui impacterait le rendement énergétique.

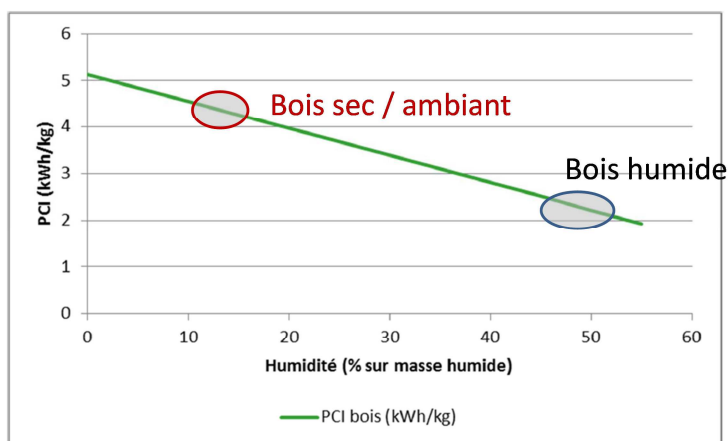


Figure 6 : PCI du bois en fonction de son humidité (source Valbiom)

1.1.2 Estimations court et long termes

L'énergie primaire disponible correspond au contenu énergétique de la biomasse à traiter annuellement par la centrale. Les valeurs calculées sur la base des gisements en bois estimés à court et long terme dans la partie précédente sont données dans le tableau ci-dessous.

	Unité	Hypothèse court terme	Hypothèse long terme
Approvisionnement biomasse	tMS/an	3 000	6 200
PCI (kWh/t)	MWh/t		4,350
Energie primaire annuelle	MWh_{PCI}	13 050	27 000

Tableau 5 : Energie primaire annuelle correspondant aux gisements estimés en bois à court et long termes.

1.2 Puissance électrique potentielle

1.2.1 Procédés de conversion et notions/définitions associées

La centrale électrique comprend des procédés qui permettent de produire, à partir du combustible, de l'électricité, ainsi que de la chaleur qui peut également être valorisée. Deux types de procédés thermiques sont à ce stade retenus: la combustion et la gazéification (Figure 5), dont les principes et les technologies seront discutés plus en détail par la suite.

Les procédés de combustion et de gazéification se déclinent en de très nombreuses variantes de technologies, qui se distinguent par plusieurs critères parmi lesquels : leurs niveaux de performances techniques, économiques et environnementales, leur disponibilité en fonction des capacités de production visée, leur fiabilité, les contraintes imposées vis-à-vis des combustibles...

La capacité de production à installer est un premier élément déterminant permettant de resserrer la gamme de technologies possibles. Nous détaillons par la suite les hypothèses retenues pour cette première phase d'évaluation.

La capacité d'une centrale électrique se caractérise par

- le tonnage annuel de biomasse traitée (tMS/an) et l'énergie primaire associée (kWh_{PCI}) ;
- l'énergie électrique réellement produite sur une année de fonctionnement (kWh_{el});
- la puissance électrique produite (kW_{el}) - on parle de puissance nominale lorsqu'elle fonctionne à pleine charge.

Le rendement électrique est le ratio entre la puissance (ou l'énergie) électrique produite et celle contenue dans la biomasse traitée = kW_{el}/kW_{PCI} (%).

1.2.2 Hypothèses de performances/fonctionnement retenues pour la centrale

- On suppose un taux de disponibilité global de 86%, correspondant à un fonctionnement de 7500 h/an de la centrale (sur les 8760 h d'une année complète). Ce taux de disponibilité englobe les périodes d'arrêt, de maintenance. Cette donnée est bien sûr fortement liée à la fiabilité de la technologie choisie. C'est un critère de performance particulièrement important qui est à considérer dans l'analyse des offres sur le marché.
- Le facteur de charge est considéré comme égal à 1. Cette hypothèse sera justifiée a posteriori, puisque la puissance électrique produite à laquelle on aboutit est très faible par rapport à la consommation seuil sur le réseau électrique de Rodrigues, de l'ordre de 3,5-4 MW_{el}. Il est ainsi envisageable que la centrale biomasse fonctionne à pleine capacité, sans subir les conséquences de variations d'appels de puissance.
- Le rendement électrique est conditionné avant tout par la technologie, mais aussi par de nombreux paramètres liés aux conditions réelles d'exploitation de la centrale (qualité du

combustible, maintenance des équipements, les compétences techniques des opérateurs...)

➔ En première approche, nous retiendrons un rendement référence de 20%, en considérant une variation possible sur une gamme comprise entre 15 et 25%.

1.2.3 Estimations court terme / long terme

Le Tableau 6 rassemble les résultats des estimations faites pour un rendement électrique moyen de 20%, sur la base des gisements en bois estimés dans la partie précédente. La capacité d'une centrale serait ainsi potentiellement de 350 kW électriques à court terme et de 720 kW électriques, à plus long terme.

Ces valeurs ne doivent être considérées que comme des ordres de grandeur, dans la limite des hypothèses décrites plus haut et des estimations des gisements disponibles. La Figure 7 permet de visualiser la sensibilité des calculs à l'hypothèse de rendement.

	Unité	Hypothèse court terme	Hypothèse long terme
Approvisionnement biomasse	tMS/an	3000	6200
Energie th annuelle	MWh _{pCl}	13046	26961
Rendement électrique	%		20%
consommation biomasse	tMS/MWh _{él}		1,15
Energie élec annuelle	MWh_{él}	2609	5392
Nb d'heures fonctionnement	h		7500
Taux de disponibilité	%		86%
Puissance électrique délivrée	kW_{él}	350	720

Tableau 6 : Calculs de la puissance électrique d'une centrale approvisionnée par du bois (gisements estimés à court terme)

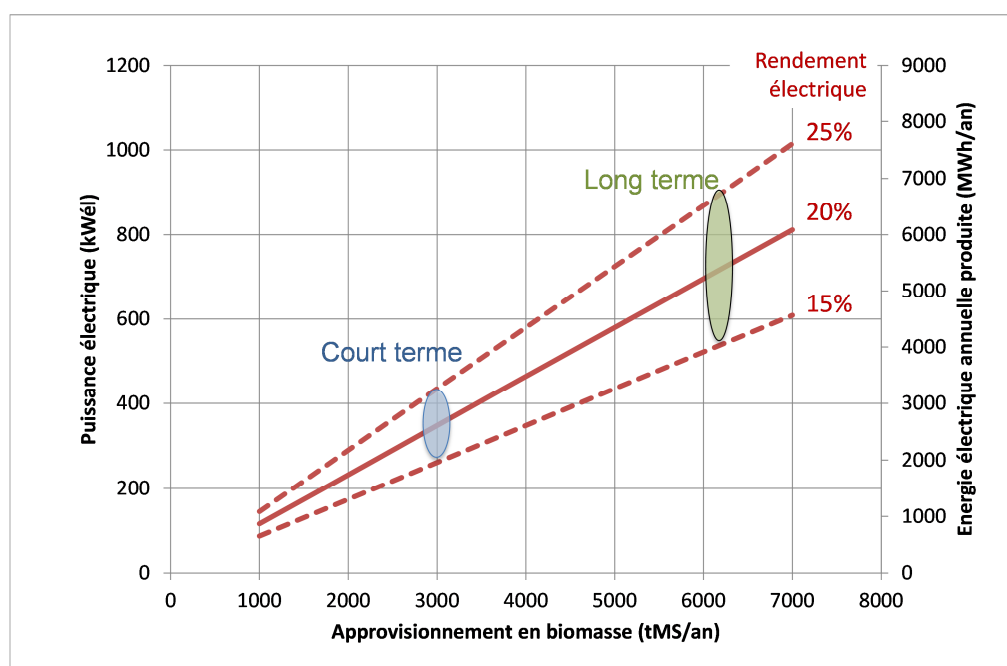


Figure 7 : Estimation de puissance électrique pour différentes valeurs de rendements électriques (15-25%), en fonction des capacités d'approvisionnement en biomasse.

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de ces estimations.

- 1- La capacité de la centrale se situerait à environ 10-15% de la puissance seuil de consommation à Rodrigues. Cela confirme que la centrale pourrait être opérée en production de base à pleine capacité, sans risque de subir les conséquences de variations d'appels de puissance du réseau.
- 2- La centrale peut être classée dans la catégorie des petites/moyennes puissances selon la terminologie couramment utilisée dans le secteur des bioénergies (<1 MWél), ce qui permet de proposer quelques premières orientations vers des solutions technologiques adaptées (discussion du point suivant).
- 3- Ces deux points restent valables (i) en considérant les gisements potentiels à court ou plus long terme ; (ii) en tenant compte des incertitudes sur les rendements qui sont dépendants des choix technologiques.

2 Propositions de solutions

2.1 Technologie envisagée pour la centrale

2.1.1 Les différences de principes entre gazéification et combustion

De façon très simplifiée, la Figure 8 illustre le principe d'une installation de combustion de biomasse :

- Le foyer, où se fait la combustion, est alimenté en combustible biomasse et en air pour produire de la chaleur.
- La chaudière produit à partir de cette chaleur de la vapeur d'eau sous pression qui alimente une machine tournante (turbine) couplée à une génératrice d'électricité. Cet ensemble est communément appelé « cycle vapeur ».

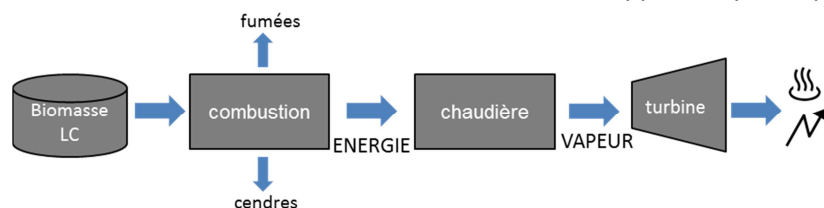


Figure 8 : production d'électricité par combustion (schéma de principe)

De même, la Figure 9 illustre le principe d'une installation de gazéification :

- Le réacteur de gazéification (gazéifieur ou gazogène) transforme la biomasse en gaz combustible par des processus thermochimiques.
- Après épuration, ces gaz sont brûlés dans un moteur couplé à une génératrice.

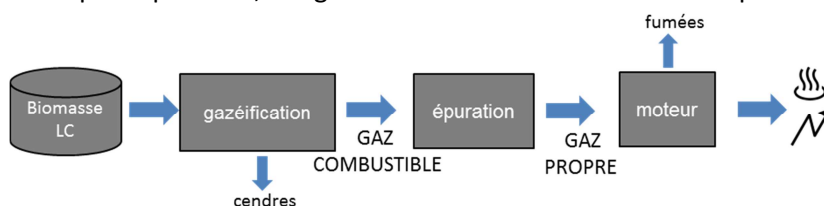


Figure 9 Schéma de principe de la production d'électricité par gazéification de biomasse lignocellulosique

Les procédés de combustion et de gazéification se déclinent en de très nombreuses variantes de technologies, qui se distinguent par plusieurs critères parmi lesquels : leurs niveaux de performances techniques, économiques et environnementales, leur disponibilité en fonction des capacités de production visée, leur fiabilité, les contraintes imposées vis-à-vis des combustibles...

Le Tableau 7 reprend les principales caractéristiques d'une sélection de technologies qui nous semblent les plus adaptées pour la production d'électricité et décrites de façon plus complète dans le cadre d'une autre étude faite pour la COI [49]. Leurs atouts et faiblesses sont discutés ci-dessous dans le contexte spécifique de Rodrigues.

2.1.2 Analyse comparative dans le contexte de Rodrigues

La combustion : une solution biomasse éprouvée, mais avec des limites pour les petites puissances

La production d'électricité par combustion de biomasse est une technologie mature et commerciale à travers le monde. Les technologies de combustion couvrent une très grande gamme de puissances, depuis les petits poêles domestiques de quelques kW, jusqu'aux grandes centrales de cogénération de plusieurs dizaines de MW.

Les foyers de combustion à grilles fixes ou mobiles sont des technologies à la fois (i) éprouvées ; (ii) adaptées à une large gamme de biomasses ; et (iii) abordables en terme de coût d'investissement.

Elles peuvent donc répondre à des besoins d'énergie dans une gamme de puissance très large mais les rendements énergétiques des centrales de petites puissances sont classiquement inférieurs à ceux des plus grosses installations.

Cependant, en production d'électricité les installations de référence ont des puissances bien supérieures à 1 MW_{el}. Il existe bien quelques constructeurs qui proposent des technologies à des puissances inférieures, mais avec beaucoup moins de recul quant aux performances. La principale contrainte porte sur le module de production électrique car les technologies sont peu rentables pour les petites puissances.

- La turbine à vapeur est la technologie la plus répandue, mais uniquement sur les grosses centrales électriques. Pour les petites puissances, l'efficacité est plus faible et les coûts de maintenance importants sont une forte contrainte.
- Pour de petites installations, la technologie moteur à vapeur peut être utilisée lorsqu'une maintenance aisée et peu coûteuse (comparativement aux turbines à vapeur) est recherchée, tout en visant une durée de vie élevée. La technologie est peu répandue du fait qu'il n'existe que très peu de constructeurs et que les rendements électriques global soient faibles (8 à 15%). Hormis un constructeur allemand dont les tarifs sont très élevés, il existe quelques constructeurs brésiliens dont les tarifs sont plus abordables, mais disposant de peu de références.
- Enfin une dernière alternative pourrait être la technologie ORC (Organic Rankine Cycle) mais les applications sont plutôt la production d'électricité à partir de chaleur perdue, basse température. Les technologies de petite puissance pour les hautes températures sont extrêmement chères et les contraintes de maintenance trop importantes.

Type	Puissance (kW _{el})	Rendement électrique (%)	Contraintes sur la biomasse Humidité (H) Granulométrie (G) Densité (D)	Limites
Combustion Grille fixe / mobile +			Biomasses diverses : bois, résidus agricoles, granulés	
- turbine vapeur	1 000 - 40 000	20-30 %	H : 5-40 %	Coût - Maintenance à petite puissance
- cycle ORC	1 000 - 10 000	10-15	G>10 mm	
- Moteur vapeur	100 - 1 000	5-15 %	Peu de fines Faible % Cendres	Disponibilité et fiabilité
Gazéification Lit fixe ou étagé + moteur à gaz			Plaquettes forestières calibrées Résidus grossiers / denses	
- technologies « simples »	20-500	10-20 %	H < 20%	Goudrons, fiabilité
- technologies « performantes »	20-300	15-25 %	G : 30-100 mm Pas de fines D > 300 kg/m ³	Maintenance, Contraintes sur biomasse

Tableau 7: Grille d'analyse d'une sélection de procédés de combustion et gazéification de biomasse (adapté de ref [49])

La gazéification : une alternative possible à la combustion les petites puissances

Des solutions technologiques sont disponibles et largement diffusées dans les gammes de petites/moyennes puissances pour la production électrique. Dans ces gammes, la technologie à lit fixe, relativement simple, est préconisée et est particulièrement adaptée à des combustibles calibrés et préalablement séchés, de type plaquettes forestières.

Les technologies à lit fixe peuvent être répertoriées en 2 catégories

- Les technologies dites « simples » sont les moins onéreuses en termes de coût d'investissement et généralement mises en place dans les pays du Sud (Asie en particulier). Elles requièrent souvent une main d'œuvre importante et sont peu fiables sur le long terme.
- Les technologies dites « performantes » sont plus complexes, plus chères mais en contrepartie plus fiables avec des références plutôt situées en contexte européen. En particulier, ce gain de performance se fait par le biais d'un contrôle/commande précis qui ajoute un niveau de complexité au fonctionnement et une exigence importante en termes de maintenance des équipements.

Au-delà de ces caractéristiques différenciantes, les 2 technologies présentent globalement les mêmes spécifications sur la biomasse entrante (Tableau 7) notamment en termes d'humidité.

Une limite forte des technologies « simples » reste la production de co-produits liquides (goudrons) dont la gestion peut s'avérer problématique d'un point de vue réglementaire et environnemental. Leur rendement énergétique légèrement plus faible n'est pas limitant dans le cadre de certains projets où la biomasse est disponible à coût très bas ou nul, ce qui ne sera vraisemblablement pas le cas à Rodrigues.

A noter enfin que certains fournisseurs de technologies proposent des solutions dites « cascade » consistant à coupler plusieurs réacteurs en parallèle pour alimenter en gaz de synthèse un ou plusieurs moteurs. Cette possibilité permettrait par exemple d'envisager une augmentation graduelle de capacité dans le temps.



Figure 10 : Exemples de centrales électriques sur le principe de couplage de réacteurs de gazéification parallèle

Pour résumer, nous préconisons plutôt pour la centrale une technologie de gazéification à lit fixe, solution qui semble la plus adaptée au contexte de Rodrigues, notamment en termes de capacité de production potentielle. Pour des raisons de fiabilité et de performances, les solutions robustes nous semblent préférables quoique plus onéreuses à l'achat, et sous réserve qu'un personnel technique puisse être formé.

2.2 Type de combustible et conditionnement requis

La forme privilégiée de combustible pour ces types de centrale est la plaquette forestière, qui est une forme de bois déchiqueté, présenté sous forme de petits morceaux de bois homogènes de calibres variables, généralement d'environ 3 x 3 x 0,5 centimètres. C'est la forme de bois-énergie la plus répandue et adaptée à de nombreuses technologies de combustion ou de gazéification.

Cette option nous semble la plus pertinente, étant donné que les ressources identifiées sur le court/moyen terme sont exclusivement des ressources forestières, dont les calibres (tiges, troncs...) sont compatibles avec la production de plaquettes.



Photo 6 : exemples de plaquettes forestières

Les étapes de préparation/conditionnement comprennent principalement des processus de broyage, criblage, et de séchage qui doivent permettre d'obtenir le calibre et l'humidité répondant aux spécifications fixées par le fournisseur de technologie.

Nous ferons ici les hypothèses suivantes:

- Les pertes de matière lors du processus de broyage sont supposées marginales (de l'ordre de 5% à dire d'expert). Ainsi, on estimera le tonnage de plaquettes équivalent à celui de bois traité. Le broyage peut être réalisé soit avec un broyeur fixe sur site dédié au conditionnement, soit avec un broyeur mobile forestier.
- Les plaquettes doivent être séchées jusqu'à un taux d'humidité de l'ordre de 15%, qui correspond aux spécifications les plus restrictives (gazéification). Ce séchage pourrait être opéré en deux phases :
 - o Un pré-séchage naturel jusqu'à une humidité de 20-30% sur une plateforme de conditionnement / stockage décrite ci-après.
 - o Une étape de séchage complémentaire contrôlé sur le site de la centrale, en valorisant la chaleur co-générée par le procédé thermique de conversion, sans besoin énergétique additionnel.

2.3 Organisation de l'approvisionnement en plaquettes forestières

Le souhait des autorités de Rodrigues serait de créer une filière d'approvisionnement en amont de la centrale, permettant la création d'un maximum d'emplois en milieu rural. Comme illustré sur la Figure 11, cette filière pourrait s'articuler autour de

- deux grands circuits d'exploitation forestière : eucalyptus d'une part et programmes de restauration des forêts et de gestion des acacias d'autre part ;
- une plateforme approvisionnée par ces deux circuits et dédiée à la préparation de plaquettes à livrer à la centrale.

Circuits d'exploitation forestière

Les ressources forestières peuvent être exploitées soit directement par le service forestier, soit par des bucherons privés sous contrat. L'exploitation des plantations d'Eucalyptus offre en particulier la possibilité de développer de petites sociétés de bucheronnages.

Une fois coupé, le bois peut être soit directement livré soit conditionné sous forme de plaquettes forestières, directement sur le chantier de bucheronnage, au moyen de broyeurs mobiles. Le Service forestier pourrait notamment en acquérir un afin de l'utiliser lors des chantiers de restauration de la forêt mixte ou lors des travaux d'éclaircies des formations d'acacia Nilotica.

Nous pensons cependant que compte tenu du contexte Rodriguais, et afin d'éviter de gros investissements par les petits bucherons privés, une plateforme centrale de broyage et de stockage pourrait être construite par les autorités locales.

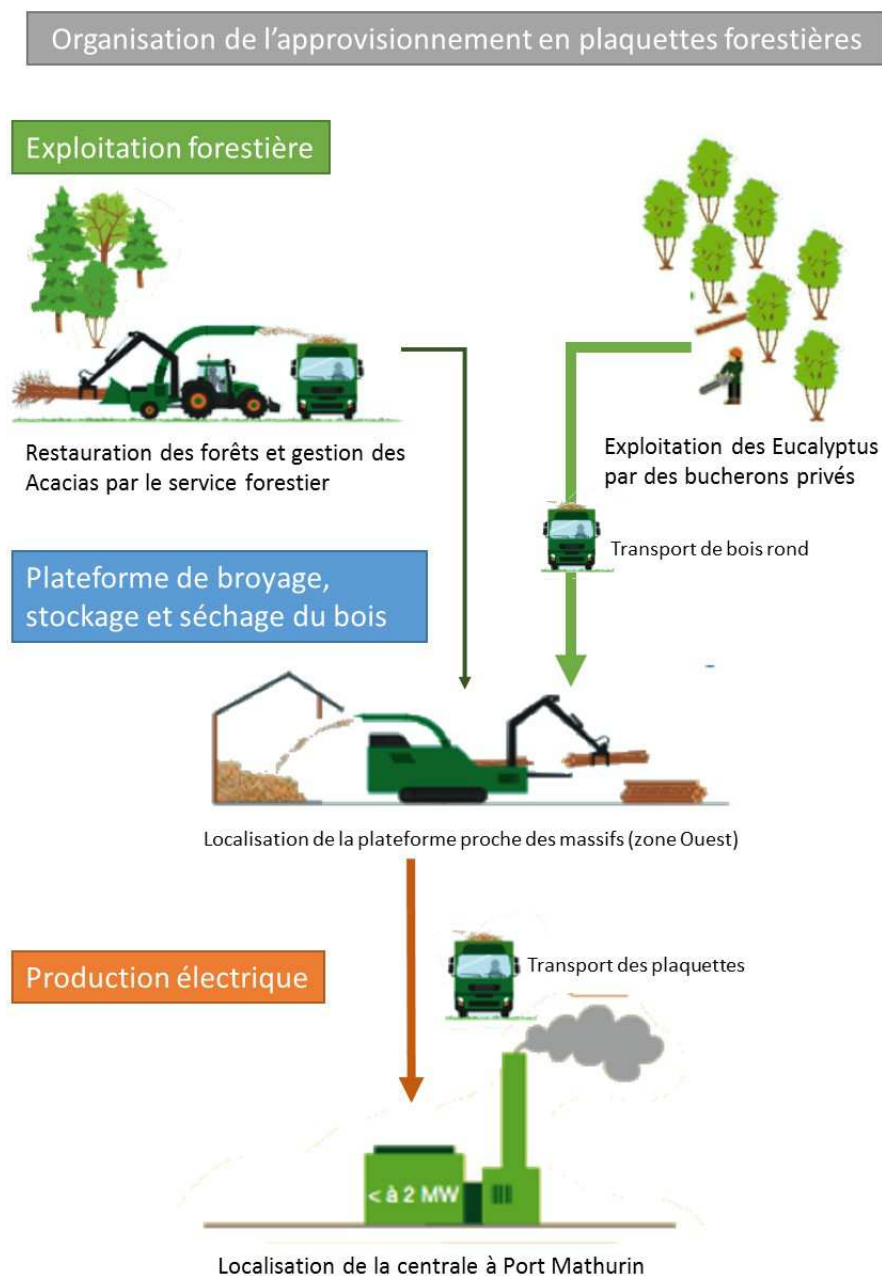


Figure 11 : Illustration d'une proposition d'organisation de l'approvisionnement en plaquettes d'une centrale

Plateforme de stockage/conditionnement

La plateforme serait dotée d'un broyeur fixe et comprendrait une aire de stockage/pré-séchage sous abri. Un dimensionnement estimatif est fourni dans la partie suivante. Sa gestion pourrait être soit par la région (service forestier ou autre service), soit confiée à une société privée, accompagnée par le service forestier. Son rôle serait de

- (i) réceptionner et décharger le bois brut ou les plaquettes fraîches apportés par les bucherons;
- (ii) broyer le bois ;
- (iii) stocker les plaquettes sur une dalle béton sous abri pendant 4 à 6 mois, jusqu'à une humidité à définir en fonction des contraintes fixées par la centrale ;
- (iv) contrôler le degré d'humidité des plaquettes ;
- (v) approvisionner régulièrement la centrale électrique par bennes de 10 m3.

En termes de localisation, la plateforme devrait idéalement être située proche des massifs forestiers, par exemple dans la région Ouest pour bénéficier d'un accès aisé au foncier et d'un climat plus sec que dans le centre de l'île.

Réception des plaquettes sur le site de la centrale

Un silo sera également installé afin de recevoir le combustible (plaquettes). Son dimensionnement devra assurer environ 30 jours de production.

La centrale pourrait être implantée à Port Mathurin, proche de la centrale électrique existante si le CEB était intéressé par l'exploitation de la centrale. Mais un autre site éventuel pourrait être identifié en fonction du bassin d'approvisionnement en biomasse et de la localisation de la plateforme, afin de minimiser les contraintes liées au transport.

2.4 Eléments préliminaires de coûts

Dans la solution proposée, de nombreux points restent à préciser et à évaluer. Néanmoins nous présentons ci-dessous une première estimation des coûts d'investissement et de production afin de fixer des premiers ordres de grandeur qui devront être affinés par une analyse économique dédiée.

2.4.1 Eléments méthodologiques

Le coût de production d'électricité comprend les catégories de coûts suivantes :

- les coûts d'investissement, liés d'une part à l'acquisition des équipements/matériels et d'autre part aux travaux/infrastructures (sites d'implantation de centrale ou plateforme) ;
- les coûts de fonctionnement (ou coûts opératoires), qui comprennent par ex pour la centrale : l'entretien et la maintenance (main d'œuvre et matériel), les consommables (achat de la biomasse, lubrifiants, etc.), les utilités (eau, air comprimé,...) et tous les frais de direction et de gestion (assurances, comptabilité, administration, etc...).

On détermine la part des coûts d'investissement à imputer chaque année en tenant compte de la durée d'amortissement et/ou de la durée de vie. Additionnés aux coûts opératoires annuels, on obtient le coût complet annuel de l'énergie électrique produite, exprimé en € (ou MUR) / kWh_{el}.

A ce stade, seuls les principaux postes de coûts seront estimés. Les valeurs unitaires retenues sont issues de sources diverses :

- Coûts d'exploitation, de débardage et de transport du bois : barèmes et tarifs pratiqués à ce jour par le service forestier de Rodrigues ;

- Coûts d'investissement et de fonctionnement de la plateforme de broyage/séchage : dimensionnement préconisé par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie – France) et coûts moyens observés en France pour des installations de petites tailles (entre 500 t de plaquettes/an et 3000 t de plaquettes/an) ;
- Coûts d'investissement et de fonctionnement d'une centrale électrique par gazéification : chiffres moyens observés par l'IRENA dans les pays de l'OCDE et avis d'experts.

Les calculs sont présentés ci-dessous sur la base d'un dimensionnement à court terme, soit pour une centrale de 350 kW_{él} approvisionnée par 3000 tMS/an de bois.

2.4.2 Coûts d'investissement

Plateforme de broyage, séchage et stockage

Selon les recommandations de l'ADEME, la taille du hangar de stockage/séchage de plaquettes doit être de 1m² par tonne de plaquette produite et celle de la plateforme au moins égale à 2m²/tonne de bois livré. Au moins deux rotations du combustible sont envisagées afin de laisser sécher les plaquettes entre 4 et 6 mois. Ainsi pour un approvisionnement de 3000 tMS de plaquette/an, un hangar de stockage de 1500 m² (soit 1500 tonnes de plaquettes en permanence) sera suffisant. On peut certainement envisager une taille un peu plus petite selon les vitesses observées de séchage et la gestion d'un plus grand nombre de rotations. La surface totale de la plateforme serait de l'ordre de 4000-4500 m².

Les coûts observés en France sont entre 250 €HT / m² et 650 €HT / m² de hangar (coûts qui couvrent l'aménagement de la plateforme et le bâtiment). On retiendra en première estimation le chiffre de 400 €/m² de hangar, même si ce chiffre devra bien évidemment être réajusté au contexte de Rodrigues.

➔ Le coût total d'investissement est ainsi estimé à 700 000 €, y compris le broyeur.

Centrale électrique par gazéification

Les équipements de la centrale comprennent le gazéifieur couplé à un générateur électrique, mais aussi tous les équipements périphériques (stockage des plaquettes avec appoint éventuel de séchage, transfert des plaquettes, raccordement au réseau électrique...) et les bâtiments.

Les tarifs fournisseurs sont très variables selon les zones géographiques et les technologies de gazéification et de moteur (cogénération ou production seule d'électricité, moteur à gaz ou dual fuel syngaz/gasoil) et les prestations associées. L'IRENA rapporte des coûts d'investissement compris entre 2000 et 6000 Euros/kW_{él} installés. Ces tarifs intègrent théoriquement l'ensemble des coûts (infrastructures, transit des équipements, frais d'étude, d'installation et de démarrage sur site...), mais une étude approfondie est indispensable pour affiner ces coûts.

Nous avons retenu pour nos estimations une valeur comprise entre 2500 et 4000 euros/kW_{él} installé.

➔ Le coût d'investissement pour la centrale serait ainsi compris entre 0,9 M€ et 1,4 M€.

Subventionnement des investissements

Ces types d'investissements peuvent largement être subventionnés. Nous avons retenu à titre d'exemple un taux de subventionnement crédible de 80% compte tenu des différents mécanismes actuels de financement en matière d'énergies renouvelables. Ainsi le reste à charge pour la collectivité s'élèverait à 140 000 € pour la plateforme et entre 175 000 et 280 000 € respectivement et la centrale, ce qui représenterait une charge annuelle respectivement de 14 800 € et entre 18 500 et 29 700 € pour un taux d'actualisation fixé à 10%. Ces charges annuelles fixes seront utilisées dans les estimations des coûts de fonctionnement.

Plateforme de broyage, séchage et stockage

Taille	Plateforme : 4000 m ² , Hangar : 1500 m ²		
Potentiel de stockage	3000 tMS de plaquettes forestières en 2 rotations/an		
	Unités	Hypothèses	Coût (Euros)
A1. Coûts d'investissement			
Coût unitaire	€/m2 hangar	400	
Coût construction plateforme	€		600 000
Broyeur mobile sur prise tracteur + équipements connexes	€		100 000
Coût total plateforme			700 000
Taux de subvention	%	80	560 000
Restant à charge	€		140 000
B1. Coûts fixes annuels			14 851
Durée de vie	an	30	
Taux d'actualisation	%	10	
Amortissements annuels	€		4 667
Intérêts annuels moyens	€		10 184

Centrale électrique par gazéification

Puissance électrique		kWél	350		
		Valeur basse		Valeur haute	
	Unités	Hypothèses	Coût (Euros)	Hypothèses	Coût (Euros)
A2. Coûts d'investissement					
Coût unitaire	€/kWél	2 500		4 000	
Coût de la centrale	€		875 000		1 400 000
Taux de subvention	%	80	700 000	80	1 120 000
Restant à charge	€		175 000		280 000
B2. Coûts fixes annuels			18 564		29 702
Durée de vie	an	30		30	
Taux d'actualisation	%	10		10	
Amortissements annuels	€		5 833		9 333
Intérêts annuels moyens	€		12 731		20 369

Tableau 8 : Estimation des coûts d'investissements totaux et annuels d'une plateforme de conditionnement / stockage et d'une centrale électrique / gazéification. Hypothèse d'un subventionnement de 80%

2.4.3 Coûts de fonctionnement et de production

Estimation du coût de la biomasse livrée à la centrale

Compte tenu de l'organisation proposée pour la filière et à l'appui des éléments de coûts de fonctionnement obtenus auprès des services forestiers et des études de cas recensées par l'IRENA et l'ADEME, une première estimation du coût de la biomasse livrée à la centrale serait de l'ordre de 4,4 MUR/kg de plaquette (soit environ 100 € /tonne de plaquettes).

Ce chiffre est très proche des coûts de production des plaquettes en France alors que la main d'œuvre est moins chère à Rodrigues. Les coûts actuels envisagés pour l'exploitation forestière sont susceptibles de diminuer. Nous avons ainsi pris comme hypothèse haute les coûts actuels de 1500 MUR/m³ et comme hypothèse basse une projection à 1200 MUR/m³ (avec une densité de 560 kg/m³), qui conduirait à une diminution du coût de la biomasse « rendu centrale » à 3,8 MUR/kgMS.

Tonnage annuel biomasse tMS 3000

Puissance électrique kWél 350

Energie électrique produite MWhél / an 2610

	Unités	Hypothèses Valeur unitaire	Quantité	Coûts HT annuels		
				Hyp basse	Hyp haute	Unité
Exploitation forestière				242 950	284 694	€
Coupe	MUR/t MS	Basse : 2 143 Haute : 2 679	3 000	166 976	208 720	€
Mise en tas bord de route	MUR/t MS	625	3 000	48 701	48 701	€
Transport plateforme	MUR/t MS	350	3 000	27 273	27 273	€
Transformation sur plateforme				55 254	55 254	€
Coûts fixes annuels (B1)				14 851	14 851	€
Coûts de fonctionnement						
Salaire 3 agents d'exploitation	MUR/mois	15 000	36	14026	14026	€
Coûts d'entretien et maintenance	Euros/an	3%	100 000	3000	3000	€
Transport centrale	MUR/t MS	300,0	3 000	23 377	23 377	€
Coûts complets des plaquettes livrées à la centrale						Euros
Coût du combustible par tonne MS rendu centrale			3 000	99	113	Euros/tMS
Coût du combustible par tonne MS rendu centrale			3 000	3,8	4,4	MUR/kgMS
Production électrique				63 515	100 843	€
Coûts fixes annuels (B2)				18 564	29 702	€
Coûts de fonctionnement						
Salaire 4 agents d'exploitation	MUR/mois	15 000	48,0	18701	18701	€
Coûts variables de gestion et de mission	Euros/Mwh	4,0	2 610	10 440	10 440	€
Coûts fixes Entretien et maintenance	MUR/an	3%		26250	42000	€
Coûts complets annuels de production électrique				372 159	440 791	Euros
Coût de production du kwh			2 610 000	0,14	0,17	Euros/kWh _{él}
Coût de production du kwh			2 610 000	5,5	6,5	MUR/kWh _é

Tableau 9 : Estimation des coûts (i) du combustible rendu centrale ; (ii) de production électrique

Estimation du coût de production de l'électricité

A partir de ces coûts de combustible livré à la centrale et en intégrant des hypothèses relatives aux coûts d'exploitation de la centrale, nous avons estimé un coût possible de production du kWh électrique compris entre 5,50 et 6,50 MUR/kWhél.

Il est rappelé que ces estimations reposent sur des hypothèses issues de données globales qui doivent être renforcées par une évaluation plus fine dans le contexte de Rodrigues et associée à une sélection de technologie plus ciblée (dont dépendent les coûts d'investissement et les coûts de fonctionnement). Par ailleurs nous avons supposé une subvention de 80% des investissements qui nous semble largement accessible.

Sur la base de ces estimations, on peut relever que les coûts d'exploitation forestière représenteraient 65% du coût complet de production électrique, ce qui met en exergue l'importance de ce poste dont les coûts peuvent être optimisés si une bonne organisation est mise en place.

Conclusions et recommandations

La mise en place d'une centrale de bioélectricité est techniquement possible à Rodrigues

Cette étude conclut que la biomasse représente une réelle opportunité pour la production d'électricité à Rodrigues, dans l'optique de sa politique de transition vers un mix énergétique plus autonome et moins carboné.

Le potentiel technique à court terme serait de l'ordre de 13 000 MWh d'énergie primaire sous forme de plaquettes forestières (bois-énergie) issues majoritairement de l'exploitation des plantations d'Eucalyptus existantes, et dans une moindre mesure des programmes de restauration des forêts mixtes et d'une exploitation marginale de peuplements anciens d'Acacia Nilotica. En termes de production électrique, ce potentiel technique représenterait de l'ordre 2600 MWh_{él} d'énergie électrique par an, ce qui équivaut à la consommation moyenne d'environ 1700 foyers rodriguais et 7% de la consommation électrique annuelle de l'ensemble de l'île.

Cette production pourrait être assurée par la mise en place d'une centrale électrique dont la capacité est estimée à 350 kW_{él}. Il s'agirait ainsi potentiellement d'une contribution significative à court terme au mix électrique ce qui représenterait près de 10 % de la puissance seuil de consommation électrique de l'île. Un tel système de production de bioélectricité pourrait par ailleurs constituer une source renouvelable d'énergie de base et avoir un intérêt technique pour la stabilité du réseau par rapport au caractère intermittent des autres ENR (éolien et solaire). Enfin, à la différence d'autres énergies renouvelables, une filière de bioélectricité rend potentiellement d'autres services au territoire : création d'emplois, valorisation de ressources, aménagement du territoire...

Ces estimations ont été faites sur la base d'hypothèses prudentes quant aux gisements de ressources mobilisables à court terme. Sur le plus long terme, une capacité supérieure de l'ordre de 720 kW_{él} peut être envisagée via (i) une meilleure gestion des plantations actuelles d'Eucalyptus qui pourraient conduire à des gains significatifs de productivité ; (ii) de nouvelles plantations à vocation énergétique, dont les essences restent à sélectionner et sur des terrains qui restent à identifier, en concertation avec les parties prenantes locales.

Des ressources forestières sont disponibles, mais le potentiel reste à valider

Les plantations existantes d'Eucalyptus constituent la principale source de bois énergie sélectionnée. L'exploitation du massif d'Eucalyptus ne représente pas de difficultés majeures, hormis dans certaines zones de très fortes pentes et il ne présente pas un danger pour la forêt Rodriguaise. Des règles simples de gestion, sous contrôle du service forestier permettraient aisément de rendre compatible cette exploitation avec les services rendus actuellement par ces formations : perches pour la construction, production de miel, et lutte contre l'érosion.

Néanmoins, ce potentiel reste à affiner par une étude plus approfondie de l'état du massif d'Eucalyptus et de sa productivité. En effet, le massif n'a pas fait l'objet d'un plan de suivi et de gestion de longue date et certaines parcelles peuvent avoir été abimées par les cyclones, le feu ou une exploitation trop intensive. Une telle étude devra aboutir à une meilleure estimation du stock sur pied, de l'état de ce stock et de sa productivité, et à un plan de gestion à long terme de ce massif.

Les autres potentiels disponibles en biomasse que nous avons retenus en complément sont constitués de bois exotiques issus (i) de la poursuite des programmes en cours de restauration des forêts mixtes et (ii) d'une exploitation marginale de quelques peuplements anciens d'Acacia Nilotica qui ont été identifiés. Là encore les stocks en biomasse et les itinéraires techniques d'exploitation

doivent être mieux évalués pour affiner le potentiel, mais ces compléments sont loin d'être négligeables.

Le cas épineux de l'Acacia Nilotica

En revanche l'exploitation de jeunes peuplements d'Acacia Nilotica, dans une logique de contrôle voire d'éradication à court terme comme souhaite la mettre en œuvre la RRA, n'est pas retenue comme source durable de biomasse énergie. L'importance de l'envahissement de l'île et notamment d'espaces de pâturage est confirmée par les repérages réalisés pour l'étude et les enjeux socio-économiques justifient bien que des mesures conséquentes soient prises.

Cependant l'éradication totale à court terme nous semble compliquée à mettre en œuvre et pose de nombreuses questions quant aux itinéraires techniques associés. La biomasse générée ne peut être considérée comme source durable de combustible sur du long terme pour une centrale.

Une alternative suggérée par les experts consisterait à gérer ces espaces pour contrôler l'envahissement, en combinant pastoralisme et production de bois-énergie. Des expérimentations sont encouragées dans ce sens pour tester différentes modalités d'exploitation et voir s'il est possible de produire un combustible adapté au type de centrale envisagé.

Nos propositions d'ordre technique et d'organisation de filière

Concernant la centrale, pour les gammes de puissance estimées et dans le contexte de Rodrigues, nous préconisons des solutions intégrant un procédé de gazéification, plus précisément des technologies à lit fixe, couplé à un groupe moteur. Ce type de procédé est techniquement pertinent pour les petites puissances électriques et adapté à des ressources bois conditionnées sous forme de plaquettes forestières. De nombreuses expériences sont rapportées dans le monde, notamment en Europe et en Asie, mais encore très peu dans la COI. Une large gamme de technologies plus ou moins performantes et onéreuses est proposée sur le marché. Pour des raisons de fiabilité et de performances, les solutions robustes nous semblent préférables quoique potentiellement plus onéreuses à l'achat, et sous réserve qu'un personnel technique puisse être formé. La question de la localisation et surtout d'un futur gestionnaire de la centrale reste posée, et devra être clarifiée en vue d'un éventuel projet.

Une réflexion a également été menée sur la filière potentielle d'approvisionnement de la centrale. Nous préconisons la mise en place d'une plateforme de conditionnement (broyage et pré-séchage) et stockage du bois, alimentée d'une part par des circuits d'exploitation forestière, et assurant d'autre part l'approvisionnement en plaquettes forestières de la centrale électrique de qualité requise. La superficie de cette plateforme est estimée à environ 4000 m² avec un hangar abrité de 1500 m² environ et elle pourrait être localisée à proximité du bassin d'approvisionnement. Elle pourrait être gérée soit directement par la région, soit par une société privée avec l'appui du service forestier, tandis que l'exploitation forestière pourrait être assurée en grande partie par des bûcherons privés.

Cette organisation permettrait la création d'emplois en milieu rural.

Des éléments préliminaires de coûts

Cette étude présente également des éléments de coûts de production qui permettent a priori de confirmer l'intérêt économique de cette solution dans le cadre de Rodrigues. Les coûts du combustible rendu centrale pourraient être compris entre 3,8 et 4,4 MUR/kg (soit 100 Euros/tonne de MS), et le coût du kWh_{el} sortie centrale pourrait en première approximation être compris entre 5,5 et 6,5 MUR/kWh_{el}. En termes d'investissements, les besoins sont estimés en première approche à environ 700 000 € pour la plateforme de stockage/conditionnement et entre 900 000 € et 1,4 M€

pour la centrale. Ces types d'investissements peuvent largement bénéficier de subventions, probablement à hauteur de 80%, hypothèse qui a été retenue pour l'estimation des coûts de revient.

Ces chiffres ont été établis à partir de coûts unitaires moyens qu'il est indispensable d'affiner par une étude de faisabilité approfondie, en fonction de l'itinéraire d'approvisionnement retenu par les autorités Rodriguaises et des choix techniques concernant la centrale.

Il est par ailleurs rappelé qu'au-delà de la rentabilité économique de la filière (coût de production du kWh électrique), une filière bioélectricité rend potentiellement au territoire d'autres services qui doivent être considérés : création d'emplois, valorisation de ressources, aménagement du territoire...

Opportunité d'un projet pilote

Au-delà des études complémentaires à réaliser, une perspective recommandée serait la mise en place d'un projet pilote dimensionné et conçu pour représenter la première tranche d'une éventuelle future centrale de plus grande envergure. La puissance installée pourrait être de l'ordre de 70-100 kW_e et la biomasse nécessaire de l'ordre de 600-900 tMS/an. Les installations mises en place (plateforme, centrale, générateurs) y seraient conçues pour pouvoir être agrandies et ainsi permettre une augmentation en capacité de production.

- Les hangars de stockage peuvent facilement être agrandis en réservant dès le départ l'emprise foncière nécessaire.
- Il est techniquement possible de concevoir des centrales par gazéification de façon modulable à condition de prévoir un bâtiment suffisamment grand dès le départ. Des solutions containerisées sont également disponibles et pourraient être testées sur le site de la plateforme, avant d'envisager un autre site dans un deuxième temps en vue d'un changement d'échelle.

Les coûts d'investissement d'un tel projet (hors études) sont estimés en première approche entre 600 000 et 800 000€ (subventionnables) mais doivent là encore être affinés.

Les intérêts d'un tel projet pilote sont multiples :

- (i) initier la construction d'une filière d'approvisionnement en bois à moindre risque ;
- (ii) tester et valider des itinéraires techniques d'exploitation des ressources, y compris des modalités de gestion des ressources et des plateformes techniques ;
- (iii) former les acteurs aux différents niveaux de la filière (exploitation d'Eucalyptus, gestion de la plateforme de stockage/conditionnement, gestion et maintenance de l'usine) ;
- (iv) optimiser les coûts complets de production électrique.

Les activités menées sur le pilote pourraient être menées dans un cadre de coopération avec la Réunion où 2 projets de plateformes de gazéification sur des ressources forestières devraient prochainement démarrer.

Annexe

1 Annexe 1 : Programmes des missions à Rodrigues

1.1 Mission du 04 au 06 décembre 2018

Jour	Objet - Lieu et personnes rencontrées
Lu 03/12 soir	Arrivée Rodrigues FB et LG – installation hébergement
Ma 04/12 Matin	Port Mathurin, Commission for Environment M. Azie, Mme Raphael, M. Ravina Présentations, organisation de la mission Problématiques : Gestion des espèces invasives, déchets urbains, biomasses agricoles
Après-midi	Port Mathurin, Commission for Environment M. le Commissaire Payendee (RRA) ; M. Azie, M. Perrine Vision stratégique de la RRA en termes de transition énergétique et de biodiversité ; sites d'intérêts pour visites terrains ----- Visites terrain avec M. Azie : repérage de zones envahies par <i>Accacia Nilotica</i> sur le littoral nord autour de Port Mathurin
Me 05/12 Matin	La Solitude - Services forestiers M. Perrine et Mme Parmasse Programme de reboisement, gestion du domaine forestier et des espèces invasives, recensement forestier. ----- Visites terrain avec M. Perrine et Mme Parmasse : Solitude, Soupir, Cascade Pigeon
Après-midi	Réunion FB / LG – Synthèse et planification
Je 06/12 Matin	CEB, Port Mathurin - M. Kevin Waterstone Enjeux de la production électrique à Rodrigues, positionnement de la CEB sur la bioélectricité / ENR, aspects réglementaires ----- Visite terrain avec MWF – Réserve de Grande Montagne
Après-midi	Port Mathurin, Commission for Environment Rencontre avec la Commission de l'Agriculture : M. Ravina, M. Gaulbert Activités agricoles générant des résidus potentiels, transformation agroalimentaire à Rodrigues
Je 06/12 et Ve 07/12	Vols retours FB et LG

1.2 Mission du 25 au 27 février 2019

Date	Objet	Lieu
25/02	Echanges sur le planning de mission Visites terrain – repérage avec le service forestier de peuplements d' <i>Acacia Nilotica</i> dans l'Ouest	Port Mathurin La Solitude Terrain
26/02	Matin : présentation des avancées de l'étude et premières tendances + discussion des suites + Rencontre AFD Après-midi : Travail avec le Service forestier sur les données cartographiques collectées	Port Mathurin La Solitude
27/02	Matin : poursuite des échanges avec le service forestier	La Solitude

2 Annexe 2 : Liste de contacts

Organisme	Personne	Fonction	email
RRA	M. J-Richard Payendee	Commissaire à l'Environnement, Agriculture, Forêts	rpayandee@hotmail.com
Commission for Environment	M. Lindsay Azie	Environment Officer COI project coord.	lindsay.azie@yahoo.co.uk
	M. G. Herman Clair	Administrative Officer	
	Mme Marie Lourdes Raphael	Environment Officer	mariloudesnathalia@yahoo.com
	M. Maurice Ravina	Environment Officer	morisrav23@gmail.com
AFD	Mme K. Serrano Manco	PO – Maurice	serranomancok@afd.fr
	Autre AFD ?		
Forestry Services	M. J. Alain Perrine	Senior Technical Officer	alainperin67@gmail.com
	M. J-Claude Rabonde	Head Forestry	
	M. L. Gonzaque Casimir	Chief FCE Officer	
	M. D. Jones Lamvohee	Principal FCE Officer	
	M. J. Daniel Perrine	Senior FCE Officer	
	Mme Ramcesse Prosper	FCE Officer	
	Mme Veena Coolen	FCE Officer	
	M. J. Heolen Manvel	Senior FCE Officer	
	M. Jacquelin Legentil	Senior FCE Officer	
	Mme Rudee Parmasse	FCE Officer	
CEB	M. Kevin Waterstone	CEB Officer Rodrigues Branch Manager	kevin.waterstone@ceb.intnet.mu
Commission Agriculture	M. Matthieu Ravina		
	M. Perrine Jean Gaulbert		
Mauritian Wildlife Foundation	M. Vikash Tatayah		vtatayah@mauritian-wildlife.org
	M. Reshad Jhangeer-Khan		r.jhangeer-khan@hotmail.com

3 Annexe 3 : Cartes

Image SPOT 6 ((C) Airbus) de décembre 2013 ayant servi à la cartographie des forêts de Rodrigues.



Références

1. Adegbehin, J.O., Okojie, J.A., Nokoe, S., 1988. Growth of *Eucalyptus tereticornis* and *Pinus caribaea* at different sites in Northern Nigeria. *Forest Ecology and Management* 23, 261–272. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(88\)90057-6](https://doi.org/10.1016/0378-1127(88)90057-6)
2. Ahimana, C., Maghembe, J.A., 1987. Growth and biomass production by young *Eucalyptus tereticornis* under agroforestry at Morogoro, Tanzania. *Forest Ecology and Management* 22, 219–228.
3. Audru, J., Labonne, M., Guérin, H., Bilha, A., 1991. *Acacia nilotica*. Une espèce fourragère traditionnelle chez les Afar de Djibouti. Une espèce de base dans les projets de restauration du milieu pastoral. CIRAD, Paris, France.
4. Chapola, G.B., Mwabumba, L., Kuyuma, O.T., 1995. Effects of initial spacing and thinning on yield and basic density of *Eucalyptus tereticornis* at Liwonde, Southern Malawi.
5. Goda, S., 1986. Growth and Yield of *Acacia nilotica* (L.) ex Willd. on the Blue Nile. *Sudan Agricultural Journal* 11107–128.
6. Indian Council of Forestry Research and Education, 2015. *Babul (Acacia nilotica)*. Dehradun, Forest Research Institute, Dehradun, India.
7. Kueffer, C., Mauremootoo, J., 2004. Case studies on the status of invasive woody plant species in the Western Indian Ocean. 3 Mauritius (Islands of Mauritius and Rodrigues). *Forest Health and Biosecurity Working Paper*.
8. Maguire, D.A., Schreuder, G.F., Shaikh, M., 1990. A biomass/yield model for high-density *Acacia nilotica* plantations in Sind, Pakistan. *Forest Ecology and Management* 37, 285–302. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(90\)90097-U](https://doi.org/10.1016/0378-1127(90)90097-U)
9. Pima, N.E., Chamshama, S.A.O., Iddi, S., Maguzu, J., 2016. Growth Performance of *Eucalypt* Clones in Tanzania. *Environment and Ecology Research* 4, 146–154.
10. Sims, R.E.H., Senelwa, K., Maiava, T., Bullock, B.T., 1999. *Eucalyptus* species for biomass energy in New Zealand—Part II: Coppice performance. *Biomass and Bioenergy* 17, 333–343. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00043-4)
11. Tewari, V.P., Singh, B., 2006. Provisional equations for estimating total and merchantable wood volume of *Acacia nilotica* trees in Gujarat State of India. *Forests, Trees and Livelihoods* 16, 277–288.
12. Ugalde, L., Pérez, O., 2001. Mean annual volume increment of selected industrial forest plantation species by forest plantation thematic papers. *Working Paper*.
13. Verhaegen, D., Randrianjafy, H., Rakotondraoelina, H., Trendelenburg, Rakotonirina, M.-C., Andriamampianina, N., Montagne, P., Rasamindisa, A., Chaix, G., Bouillet, J.-P., Bouvet, J.-M., 2014. *Eucalyptus robusta* pour une production durable de bois énergie à Madagascar : bilan des connaissances et perspectives. *Bois et Forêts des Tropiques* 15–30.
14. Broust F., Gazull L., Rakotoarivelo M., Van de Steene L., Galaouic R., Pinta F. Etude du potentiel de valorisation énergétique (bioélectricité) de la biomasse ligneuse par conversion thermique dans les Etats membres de la Commission de l'Océan Indien – Rapport final de l'étude n° COI/ENERGIE/SERV/2018/035